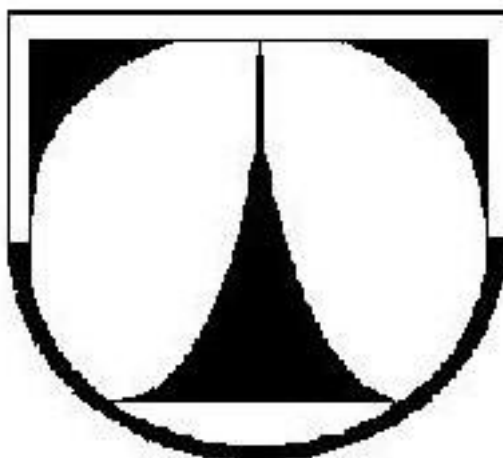


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ



BAKALAŘSKÁ PRÁCE

JAN DOSTÁL
LIBEREC 2012

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program B2341 – Strojírenství

Materiály a technologie
zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů

Odpružení při volném ohybu

Suspension in free bending

Jan Dostál

KSP – TP – BP

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Doubek, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce: Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.

Rozsah práce a příloh:

Počet stran:	53
Počet tabulek:	8
Počet příloh:	6
Počet obrázků:	33
Počet jiných příloh:	1 CD

Datum: 6. 1. 2012



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno a příjmení

J a n D O S T Á L

Studijní program

B2341 Strojírenství

Studijní obor

3911R018 Materiály a technologie

Zaměření

Tváření kovů a plastů

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje bakalářská práce na téma:

Odpružení při volném ohybu

Zásady pro vypracování:

(uveďte hlavní cíle bakalářské práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Seznámení se s problematikou technologie ohýbání a odpružení při ohýbání.
2. Základní možnosti bezkontaktního způsobu hodnocení deformace tvářených materiálů.
3. Návrh vhodné metodiky pro hodnocení velikosti odpružení při volném ohybu.
4. Vyhodnocení velikosti odpružení při volném ohybu na vybraných materiálech.
5. Vyhodnocení výsledků.
6. Závěr.

Forma zpracování bakalářské práce:


- průvodní zpráva: cca 30 stran
- grafické práce: grafy, tabulky

Seznam literatury (uveďte doporučenou odbornou literaturu):

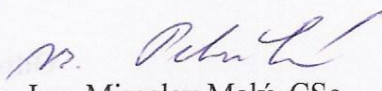
- [1] VELES, P.: Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov, ALFA Bratislava, 1989.
- [2] KOLEKTIV: ASM Handbook 8., Mechanical Testing and Evaluation, ASM International, 2000.
- [3] MARCINIAK Zdislaw: Teorie tváření plechů, SNTL Praha, 1964.
- [4] PETRUŽELKA, J. – BŘEZINA, R.: Tváritelnost kovových materiálů, VŠB- TU Ostrava, 2001.
- [5] Materiálové listy a technická firemní dokumentace.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Doubek, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce: Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
vedoucí katedry




doc. Ing. Miroslav Malý, CSc.
děkan

V Liberci dne 29. 10. 2011

Platnost zadání bakalářské práce je 15 měsíců od výše uvedeného data (v uvedené lhůtě je třeba podat přihlášku ke SZZ). Termíny odevzdání bakalářské práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.

A N O T A C E

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studijní program: B2341 – Strojírenství

Student: Jan Dostál

Téma práce: Odpružení při volném ohybu
Suspension in free bending

Číslo BP: KSP – TP – BP

Vedoucí BP: Ing. Pavel Doubek, Ph.D. - *TU v Liberci*

Konzultant: Ing. Jiří Sobotka, Ph.D. - *TU v Liberci*

Abstrakt:

Tato bakalářská práce se zabývá odpružením materiálu S235JR při volném ohybu. Ověřuje základní možnosti a vhodnost použití bezkontaktních optických měřicích systémů pro měření úhlu odpružení. Naměřené hodnoty pak porovnává s teoretickým výpočtem a poskytuje tak srovnání jednotlivých metod. Zároveň rozšiřuje povědomí o použití bezkontaktních optických měřicích systémech ve strojírenství.

Abstract:

This bachelor thesis deals with the suspension of the material S235JR in free bending. It verifies the basic options and appropriateness of using non-contact optical measurement systems for measuring the angle of the suspension. The thesis then compares the measured values with a theoretical calculation and provides a comparison of different methods. The thesis also expands the awareness of the use of non-contact optical measurement systems in engineering.

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 6. 1. 2012

.....
Jan Dostál
Vrchlického 249/22
460 14 Liberec 13

Poděkování:

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Pavlu Doubkovi, Ph.D. a konzultantovi Ing. Jiřímu Sobotkovi, Ph.D. za jejich odborné vedení, rady a věcné připomínky, které mi pomohly k lepší orientaci v tématu předkládané bakalářské práce.

Dále bych rád poděkoval své rodině za podporu v celém období mého studia.



Obsah:

1. Úvod	9
2. Teoretická část	10
2.1. Tváření kovů	10
2.1.1. Charakteristiky tvářeného materiálu	10
2.2. Teorie ohýbání	10
2.2.1. Rozdělení ohýbání	11
2.2.2. Přetvoření (deformace) průřezu	11
2.2.3. Neutrální osa	12
2.2.4. Výpočet ohybového momentu	13
2.2.4.1. Ohýbání bez zpevnění	13
2.2.4.2. Ohýbání se zpevněním	15
2.2.5. Odpružení	15
2.2.5.1. Příčiny vzniku odpružení	15
2.2.5.2. Metody určení velikosti úhlu odpružení	16
2.2.5.3. Moderní metody určení odpružení	17
2.2.5.5. Vlivy působící na velikost odpružení	19
2.2.5.5. Způsoby eliminace odpružení při ohýbání	20
2.2.5.6. Závěrečné shrnutí k teorii odpružení	22
2.3. Fotogrammetrie	23
2.3.1. Optické systémy	23
2.3.1.1. Optický měřicí systém ARAMIS	24
2.3.1.2. Optický měřicí systém ARGUS	25
2.3.1.3. Optický měřicí systém PONTOS	25
3. Experimentální část	26
3.1. Měření a vyhodnocení pomocí systému ARAMIS	26
3.1.1. Průběh zkoušky	27
3.1.2. Zpracování výsledků zkoušky	28
3.1.3. Vyhodnocení výsledků zkoušky	29
3.2. Měření a vyhodnocení pomocí softwaru Image-Pro plus	30
3.2.1. Průběh zkoušky	30
3.2.2. Zpracování výsledků zkoušky	31
3.2.3. Vyhodnocení výsledků zkoušky	32
3.2.4. Výpočet hodnot ze zatěžovacího stroje	34
3.2.5. Porovnání výsledků zkoušky	38
4. Závěr	40
5. Seznam použité literatury	42
6. Seznam příloh	44



Seznam použitých značek, veličin a jednotek:

Značka	Veličina	Jednotka
R_e	mez kluzu	[MPa]
R_m	mez pevnosti	[MPa]
A_x	tažnost	[%]
Z	kontrakce	[%]
b	šířka ohýbaného polotovaru	[mm]
t	tloušťka ohýbaného polotovaru	[mm]
σ_1	podélná napětí	[MPa]
σ_2	příčná napětí	[MPa]
σ_3	tlaková radiální napětí	[MPa]
σ_{1P}	napětí v krajních vláknech	[MPa]
σ_{1PMAX}	maximální napětí v krajních vláknech	[MPa]
ε_1	prodloužení / zkrácení v podélném směru	[–]
ε_2	rozšíření / zúžení v příčném směru	[–]
ε_3	zesílení / zeslabení v radiálním směru	[–]
r	vnitřní poloměr ohybu	[mm]
x	koeficient posunutí neutrální osy	[–]
k	součinitel určující polohu neutrální osy	[–]
E	modul pružnosti v tahu (Youngův modul)	[MPa]
M_P	ohybový moment při začínající plastické deformaci pro úzké tyče bez zpevnění	[N · mm]
M_{MAX}	ohybový moment při úplné plastické deformaci pro úzké tyče bez zpevnění	[N · mm]
M'_P	ohybový moment při začínající plastické deformaci pro široké pásy bez zpevnění	[N · mm]
M'_{MAX}	ohybový moment při úplné plastické deformaci pro široké pásy bez zpevnění	[N · mm]
M_{MAXZ}	ohybový moment pro úzké tyče se zpevněním	[N · mm]
M'_{MAXZ}	ohybový moment pro široké pásy se zpevněním	[N · mm]
M	ohybový moment	[N · mm]
J	kvadratický moment	[mm ⁴]
ρ	poloměr neutrální osy v ohybu	[mm]
ρ_1	poloměr neutrální osy při zatížení	[mm]



Značka	Veličina	Jednotka
$1/\rho$	zakřivení	$[\text{mm}^{-1}]$
ρ_2	poloměr neutrální osy při odlehčení	$[\text{mm}]$
ρ_2	poloměr neutrální osy při odlehčení	$[\text{mm}]$
μ	Poissonova konstanta	$[-]$
l	délka neutrální osy	$[\text{mm}]$
α	úhel ohybu	$[\circ]$
α_1	úhel ohybu při zatížení	$[\circ]$
α_2	úhel ohybu při odlehčení	$[\circ]$
$\Delta\alpha$	úhel odpružení	$[\circ]$
β	úhel ohnutí	$[\circ]$
β_1	úhel ohnutí při zatížení	$[\circ]$
β_2	úhel ohnutí při odlehčení	$[\circ]$
n_0	míra posunutí neutrální osy	$[\text{mm}]$
l_p	vzdálenost podpěr	$[\text{mm}]$
M_{MAX}	maximální ohybový moment	$[\text{N}\cdot\text{mm}]$
F_{MAX}	maximální ohýbací síla	$[\text{N}]$
F_0	ohýbací síla	$[\text{N}]$
y_{MAX}	maximální průhyb	$[\text{mm}]$
px	pixel	$[\text{px}]$
π	Ludolfovo číslo	$[-]$
D	průměr válce ohýbacího nástroje	$[\text{mm}]$
d	průměr válců prizmatického přípravku	$[\text{mm}]$
γ	úhel podbroušení ohybníku	$[\circ]$



1. Úvod

Při výrobě dílů technologií ohýbání za studena má na přesnost výrobku největší vliv odpružení materiálu. Odpružení způsobuje u ohýbaných výrobků velké tvarové a rozměrové nepřesnosti. Proto je v průmyslu vynakládáno velké úsilí k nalezení efektivních způsobů zjišťování velikosti odpružení a jeho jednoduché eliminaci.

Přesto, že se technologie ohýbání ke zpracování kovových materiálů používá v podstatě od nepaměti, není až dodnes uspokojivě vyřešena problematika odpružení při ohýbání.

Odpružení je velmi specifický jev, jehož průběh a velikost závisí od celé řady proměnných, jako jsou například rozměry ohýbaného materiálu, mechanické vlastnosti materiálu, úhel a způsob ohýbání a další. Kvůli velkému množství proměnných nelze nalézt univerzální a jednoduše použitelný způsob zjištění či ověření konkrétní velikosti odpružení. Velikost odpružení lze určit pomocí teoretických vztahů převzatých z odborné literatury, zahrnující mnohá kritéria, nebo pomocí praktických zkoušek či z předchozích zkušeností zainteresovaných pracovníků. V dnešní pokročilé době existuje několik moderních metod, některé z nich jsou uvedeny v kapitole 2.2.5.3.

Při navrhování výrobku, jehož výrobní postup zahrnuje ohýbací operace je nutno uvažovat odpružení. Jeho velikost je nutné určit. Teoretické vzorce převzaté z odborné literatury ale nezaručují vždy v konkrétním případě přesné a prakticky použitelné výsledky. Z praxe vyplývá, že hodnoty určené výpočtem se od skutečných hodnot odpružení často výrazně liší.

Problematické odpružení se bude podrobně věnovat tato bakalářská práce. Práce je zaměřena k možnému využití moderních způsobů měření velikosti úhlů odpružení pomocí optických měřících systémů a k nim příslušných softwarových řešení.

Teoretická část práce bude obsahovat krátké rozdělení a charakteristiku tváření, dále se bude podrobněji věnovat tváření ohýbáním za studena a zejména pak vlivům odpružení při tomto způsobu tváření.

V experimentální části práce budou zjišťovány úhly odpružení pomocí dvou různých bezkontaktních optických měřících systémů. Dále bude obsahem této části výpočet hodnot úhlů odpružení pomocí teoretických výpočtů převzatých z odborné literatury.

Vyhodnocení pak bude obsahovat vzájemné porovnání naměřených a vypočtených hodnot úhlů odpružení. Bude uveden souhrn získaných a dále využitelných poznatků.

Cílem bakalářské práce bude tedy ověření možnosti použití bezkontaktních systémů při měření úhlu ohybu a rozšíření povědomí o zmíněných optických systémech.



2. Teoretická část

2.1. Tváření kovů

Tváření kovů je technologický proces, při kterém dochází k požadované změně tvaru polotovaru v důsledku působení vnějších sil bez odběru třísky tak, aby nedošlo k porušení celistvosti (kromě stříhání) tzn., že se částice materiálu pouze trvale přemísťují. Cílem tváření je vznik plastických deformací v materiálu, ke kterým dochází po překročení meze kluzu. Vliv na proces tváření má materiál a jeho mechanické vlastnosti, teplota tváření, deformační rychlost a stav napjatosti. [1]

2.1.1. Charakteristiky tvářeného materiálu

a) Deformační schopnost materiálu

Je to celková elastická i plastická deformace, které je materiál schopen dosáhnout. Jinak řečeno, je to schopnost materiálu k jeho trvalému přetvoření bez porušení jeho celistvosti. Je charakterizována hodnotami tažnosti A_x a kontrakce Z . [2], [3]

b) Deformační odpor materiálu

Je napětí, které musí být dosaženo, aby se materiál tvářel. Tzn. nutnost dosažení plastické deformace (dosažení meze kluzu R_e). Je charakterizován veličinami mez kluzu R_e a mez pevnosti R_m . [2], [3]

2.2. Teorie ohýbání

Ohýbání můžeme podle teploty rozdělit na ohýbání za tepla a studena. Dále bude věnován prostor pouze ohýbání za studena. Ohýbání za studena je způsob plošného tváření (převládají deformace ve dvou osách), při kterém je materiál trvale deformován pod různými ohybovými úhly s menším či větším zaoblením hran. Je to zvláštní proces elasticko-plastické deformace, která má různý průběh od povrchu směrem k neutrální ose ohýbaného polotovaru. Napětí v krajních vláknech jsou největší, a zároveň opačného smyslu (na vnější straně tahová, na vnitřní straně tlaková). Tyto dvě oblasti od sebe odděluje neutrální osa (viz. kapitola 2.2.3.). [1], [4]

Ohnutí polotovaru do žádoucího tvaru využívá stejných principů jako ostatní tvářecí technologie, tzn. překročení meze kluzu materiálu do oblasti plastické deformace. Plastická deformace je doprovázena elastickou, která se v případě technologie ohýbání projevuje nežádoucím efektem odpružení. Právě odpružení má na rozdíl od ostatních tvářecích technologií u ohýbání velký význam (viz. kapitola 2.2.5.). [1], [4]

2.2.1. Rozdělení ohýbání

Technologii ohýbání je možné rozdělit podle mnoha kritérií. Ty nejzákladnější možnosti rozdělení jsou uvedeny v této kapitole.

a) Rozdělení podle pohybu nástroje vůči materiálu



Obr. 2.1: Schéma základního rozdělení ohýbání podle způsobu pohybu nástroje vzhledem k materiálu a jeho následných způsobů [6]

b) Rozdělení podle poloměru zakřivení v místě ohybu

- Ohyb s malým poloměrem zakřivení při velkém stupni tvárné deformace.
- Ohyb s velkým poloměrem zakřivení při malém stupni tvárné deformace. (podrobněji viz. [5], kapitola 12, strana 78 až 79) [5]

c) Rozdělení podle poměru šířky polotovaru b k tloušťce polotovaru t

Tomuto aspektu se věnuje kapitola 2.2.2.

d) Rozdělení podle tvaru ohybu

Podle tvaru ohybu rozdělujeme ohýbání do tvaru U a tvaru V (podrobněji viz. [5], kapitola 7.2, strana 77).

2.2.2. Přetvoření (deformace) průřezu

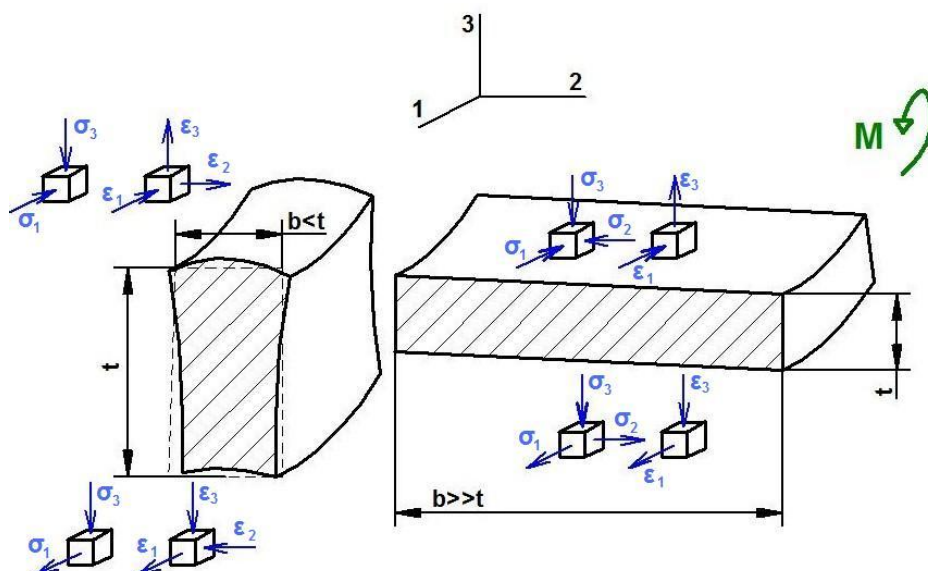
Při ohýbání rozeznáváme z hlediska přetvoření průřezu dva typy průřezů dané vzájemným poměrem šířky polotovaru b a tloušťky polotovaru t . Obecně platí, že úzké tyče jsou při ohýbání více deformovány než široké pásy (viz. obrázek 2.2). Také platí, že při obou typech ohybu dochází na vnitřní straně ohybu ke stlačování podélných vláken a na vnější straně ohybu k jejich natahování. Platí zákon zachování objemu. Z něj plyne, že velikost deformace prodloužení v jednom směru je rovná velikosti deformace zkrácení ve směru opačném. [5], [7]

a) Ohýbání úzkých tyčí ($b < t$)

Šířka polotovaru je značně menší než tloušťka. Materiál není schopen v příčném směru vyvodit odpor vůči přetvoření průřezu (napětí σ_2 můžeme ignorovat). Na vnitřní straně se vlivem ohybu šířka tyče zvětšuje, na vnější straně naopak zmenšuje (viz. obrázek 2.2 vlevo). [5], [7]

b) Ohýbání širokých pásů a plechů ($b \gg t$)

Jak ukazuje obrázek 2.2 vpravo, k deformaci průřezu v příčném směru téměř nedochází, protože proti deformaci působí napětí σ_2 (odpor materiálu způsobený značnou šířkou polotovaru vzhledem k jeho tloušťce). Proto lze v praxi tuto deformaci zanedbat a uvažovat pouze plošnou deformaci pásu. [5], [7]



- σ_1 ... podélná tahová a tlaková napětí
- σ_2 ... napětí způsobená odporem materiálu v příčném směru
- σ_3 ... tlaková radiální napětí způsobená tlakem krajních vrstev materiálu na vnitřní vrstvy
- ϵ_1 ... prodloužení / zkrácení v podélném směru
- ϵ_2 ... rozšíření / zúžení v příčném směru
- ϵ_3 ... zesílení / zeslabení v radiálním směru

Obr. 2.2: Napětí a deformace při ohýbání úzké tyče a širokého pásu /1/

2.2.3. Neutrální osa

Vlákna na vnější straně ohybu jsou namáhána tahem, vlákna na vnitřní straně ohybu tlakem (viz. obrázek 2.2 a 2.4). Největší tahová a tlaková napětí jsou na okrajích průřezu, směrem k neutrální ose postupně klesají. Neutrální osa odděluje oblast s tahovým a tlakovým napětím. Nepůsobí na ni žádné napětí a během ohybu se nedeformuje (nemění svou délku, viz. obrázek 2.4), proto má velký význam v určování délky polotovaru. Bez znalosti hodnoty její velikosti nelze vypočítat délku polotovaru (rozvin) (viz. vzorec (2.1)). Ve skutečnosti má neutrální osa tvar paraboly, je však nahrazována kruhovým obloukem. Neutrální osa se vyskytuje u všech typů ohybu. Její poloha nejvíce závisí na poměrném poloměru ohybu r/t jak je patrné z tabulky 2.3. (podrobněji viz. [5], kapitola 11, strana. 72). [2], [5]

U ohybů tenkých plechů a ohybů s poměrným poloměrem $r/t > 12$ je vychýlení neutrální osy vůči ose polotovaru zanedbatelné, proto se v běžné praxi v tomto případě uvažuje poloha osy v polovině tloušťky polotovaru.

Při hodnotě poměrného poloměru ohybu $r/t < 6$ (vlivem provedení ohybu za studena s malým poloměrem ohybu) dochází ke změně tloušťky v místě ohybu a k posunu neutrální osy směrem k vnitřní straně ohybu o vzdálenost vyjádřenou koeficientem x . Velikost koeficientu x je v tabulce 2.3. Platí, že rozvinutá délka ohybu, je zároveň délka neutrální osy v ohybu. [8]

Tab. 2.3: Tabulka závislosti vybraných hodnot koeficientu posunutí neutrální osy na poměrném poloměru ohybu /9/

r/t	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	1	1,5	2	3	4
x	0,23	0,29	0,32	0,35	0,37	0,39	0,41	0,44	0,45	0,46	0,47

Do výpočtu je možno zahrnout další proměnné jako je koeficient zúžení materiálu. Rozvinutá délka ohybu se vypočítá dle vzorce (2.1): [1]

$$l = \alpha \cdot (r + x \cdot t) \quad [mm] \quad (2.1)$$

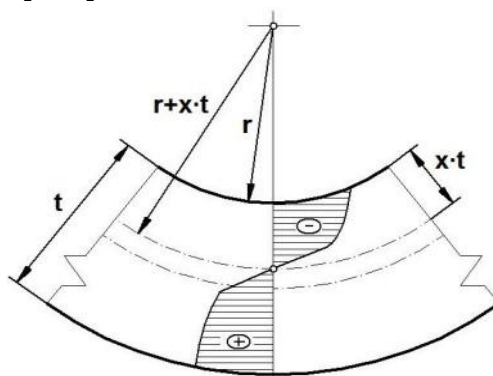
L ... délka neutrální osy [mm]

α ... úhel ohybu [rad]

r ... poloměr ohybu na vnitřní straně [mm]

x ... koeficient posunutí neutrální osy [-]

t ... tloušťka materiálu [mm]



Obr. 2.4: Neutrální osa v ohybku /8/

2.2.4. Výpočet ohybového momentu

V této kapitole bude uveden stručný výčet vzorců s příslušným popisem, které budou sloužit v experimentální části pro výpočty úhlů odpružení z hodnot získaných z charakteristik zatěžování ze zatěžovacího stroje. Pro úplnost budou v kapitole 2.2.4.1. uvedeny vzorce pro výpočet odpružení pro idealizovaný materiál (bez zpevnění), v kapitole 2.2.4.2. pro reálný materiál (se zpevněním). [6], [10]

2.2.4.1. Ohýbání bez zpevnění

a) Ohýbání úzkých tyčí

Úsečka OP zobrazuje v grafu 2.5 oblast pružné deformace. Bod P značí přechod do oblasti plastické deformace. Vzorec (2.2) vyjadřuje velikost ohybového momentu, při kterém začíná fáze plastických deformací. [6], [10]

$$M_P = R_e \cdot \frac{b \cdot t^2}{6} \quad [N \cdot mm] \quad (2.2)$$

Pokud se plastická deformace rozšíří na celou tloušťku tyče, platí vzorec (2.3).

$$M_{MAX} = R_e \cdot \frac{b \cdot t^2}{4} \quad [N \cdot mm] \quad (2.3)$$

b) Ohýbání širokých pásů

Při ohýbání širokých pásů k deformaci průřezu v příčném směru téměř nedochází (viz. kapitola 2.2.2.). Hodnoty momentů M_P a M_{MAX} se zvětší o hodnotu $2/\sqrt{3}$ oproti ohybovým momentům u úzkých tyčí. [6], [10]

Analogicky platí:

$$M'_P = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot R_e \cdot \frac{b \cdot t^2}{6} \quad [N \cdot mm] \quad (2.4)$$

$$M'_{MAX} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot R_e \cdot \frac{b \cdot t^2}{4} \quad [N \cdot mm] \quad (2.5)$$

M_P ... ohybový moment při začínající plastické deformaci, platí pro úzké tyče bez zpevnění $[N \cdot mm]$

M_{MAX} ... ohybový moment při úplné plastické deformaci, platí pro úzké tyče bez zpevnění $[N \cdot mm]$

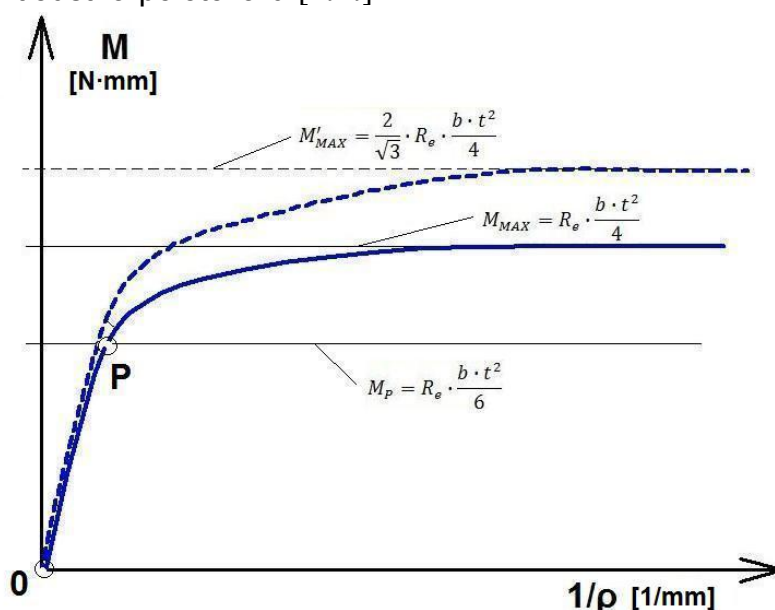
M'_P ... ohybový moment při začínající plastické deformaci, platí pro široké pásy bez zpevnění $[N \cdot mm]$

M'_{MAX} ... ohybový moment při úplné plastické deformaci, platí pro široké pásy bez zpevnění $[N \cdot mm]$

R_e ... mez kluzu $[MPa]$

b ... šířka polotovaru $[mm]$

t ... tloušťka polotovaru $[mm]$



Obr. 2.5: Fáze rozložení napětí v průřezu ohýbaného materiálu /6/

2.2.4.2. Ohýbání se zpevněním

Ve skutečnosti při tváření za studena mez kluzu roste v závislosti na stupni plastické deformace a dochází ke zpevnění. Proto se zvětšuje napětí σ_1 . Největší nárůst napětí je v krajních vláknech materiálu (viz. obrázek 2.6 vlevo). Hustě šrafovaná oblast vyjadřuje přírůstek napětí způsobeného zpevněním. Po vyčerpání plastičnosti dojde k porušení celistvosti, musí tedy platit, že $\sigma_{1PMAX} < R_m$. S růstem napětí roste i ohybový moment (viz. obrázek 2.6 vpravo, šrafovaná oblast vyjadřuje přírůstek ohybového momentu u širokých pásů). [6], [10] Pak platí vzorce:

Pro úzké tyče:
$$M_{MAX_Z} = \sigma_{1P} \cdot \frac{b \cdot t^2}{4} \quad [N \cdot mm] \quad (2.6)$$

Pro široké pásy:
$$M'_{MAX_Z} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_{1P} \cdot \frac{b \cdot t^2}{4} \quad [N \cdot mm] \quad (2.7)$$

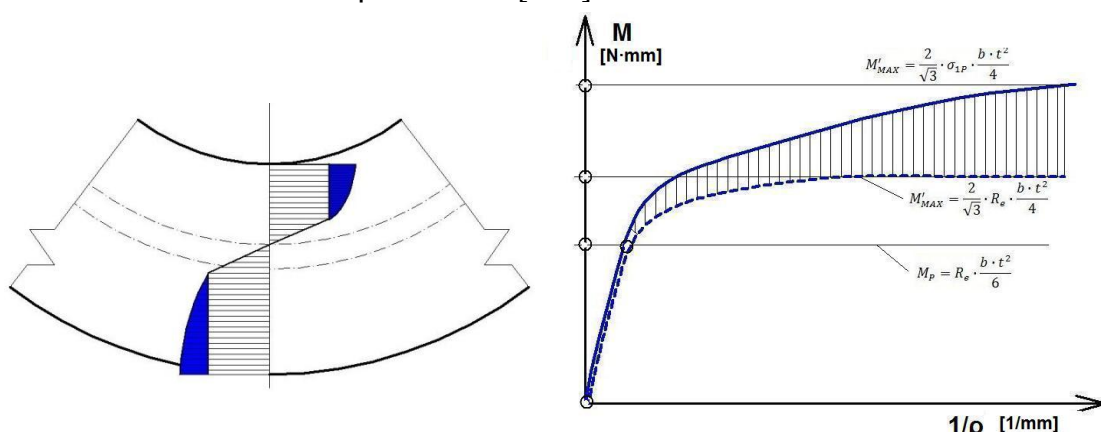
M_{MAX_Z} ... ohybový moment pro úzké tyče se zpevněním $[N \cdot mm]$

M'_{MAX_Z} ... ohybový moment pro široké pásy se zpevněním $[N \cdot mm]$

σ_{1P} ... napětí v krajních vláknech materiálu $[MPa]$

b ... šířka polotovaru $[mm]$

t ... tloušťka polotovaru $[mm]$



Obr. 2.6: Vlevo přírůstek napětí vlivem zpevnění materiálu. Vpravo rozdíl mezi velikostmi ohybového momentu $/6/$

2.2.5. Odpružení

Při ohýbání vzniká trvalá (plastická) a pružná (elastická) deformace. Po ohnutí na ohybek přestanou působit vnější síly (ohýbací síla) a jednotlivé části ohybku mají tendenci se částečně vrátit do svých původních pozic. Tím se výsledný tvar ohybku od tvaru ohýbadla, ve kterém byl ohybek tvářen, liší. Tento jev se nazývá odpružení. Odpružení u ostatních technologií tváření bylo zanedbatelné, v případě ohýbání má ale velký význam. [2], [5]

2.2.5.1. Příčiny vzniku odpružení

Příčinou vzniku odpružení jsou pružné (elastické) deformace. Jako při každé tvářecí technologii tak i při ohýbání je nutné dostat se do oblasti



trvalých (plastických) deformací, tzn. do rozmezí meze kluzu R_e a meze pevnosti R_m materiálu. Ohýbání je pružně-plastická deformace. Nejvíce jsou plasticky deformována krajní vlákna ohybku, směrem k neutrální ose velikost deformace klesá. V určité vzdálenosti od krajních vláken velikost napětí klesá pod hodnotu meze kluzu R_e , tudíž se zde vyskytuje pouze pružná deformace, která po odlehčení způsobuje odpružení. [1], [2], [5]

2.2.5.2. Metody určení velikosti úhlu odpružení

Při volném ohýbání závisí odpružení na aspektech uvedených v kapitole 2.2.5.4. Odpružení se zpravidla vyjadřuje změnou úhlu.

Rozlišujeme dvě základní metody určení velikosti odpružení. Zkušební a početní uvedenou níže. Při početní metodě musíme rozlišovat odpružení vznikající při volném ohybu a při ohybu s kalibrací. Pro lepší přesnost je vhodné výsledek početní metody ještě ověřit zkouškou. V odborné literatuře jsou uváděny mnohé vzorce, pro rozsah této práce budou použity pouze níže uvedené vzorce převzaté z odborné literatury. [4], [5]

a) Výpočtové vzorce založené na závislosti ohybového momentu a zakřivení (převzato viz. [6], strana 60 až 62)

Na obrázku 2.7 vlevo je znázorněna závislost mezi ohybovým momentem M a zakřivením $1/\rho$. Vztahuje se na případ, kdy ohybový moment vzrůstá od bodu O přes bod P až k bodu A . Tam dosahuje moment i ohyb maximální hodnoty. Pokud se hodnota ohybového momentu začne zmenšovat, dojde k odlehčení (nastává zpětná pružná deformace odpružení, viz. obrázek 2.7 vpravo). To vyjadřuje přímka AB rovnoběžná s přímkou OP . Jakmile ohybový moment klesne na nulu, zmenší se ohyb materiálu z hodnoty $1/\rho_1$ na hodnotu $1/\rho_2$. [6] Pak platí vzorce:

$$\text{Pro úzké tyče: } \frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2} = \frac{M}{E \cdot J} = \frac{2 \cdot \sigma_{1P}}{t \cdot E} \quad [mm^{-1}] \quad (2.8)$$

$$\text{Pro široké pásy: } \frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2} = \frac{M}{E \cdot J} \cdot (1 - \mu^2) = \frac{2 \cdot \sigma_{1P}}{t \cdot E} \cdot (1 - \mu^2) \quad [mm^{-1}] \quad (2.9)$$

Po dosazení vztahu pro vyjádření příslušných poloměrů ohybu ρ_1 a ρ_2 pomocí úhlů ohybu α_1 a α_2 a délky oblouku ($\rho_1 \cdot \alpha_1 = \rho_2 \cdot \alpha_2 = l$) [6] platí:

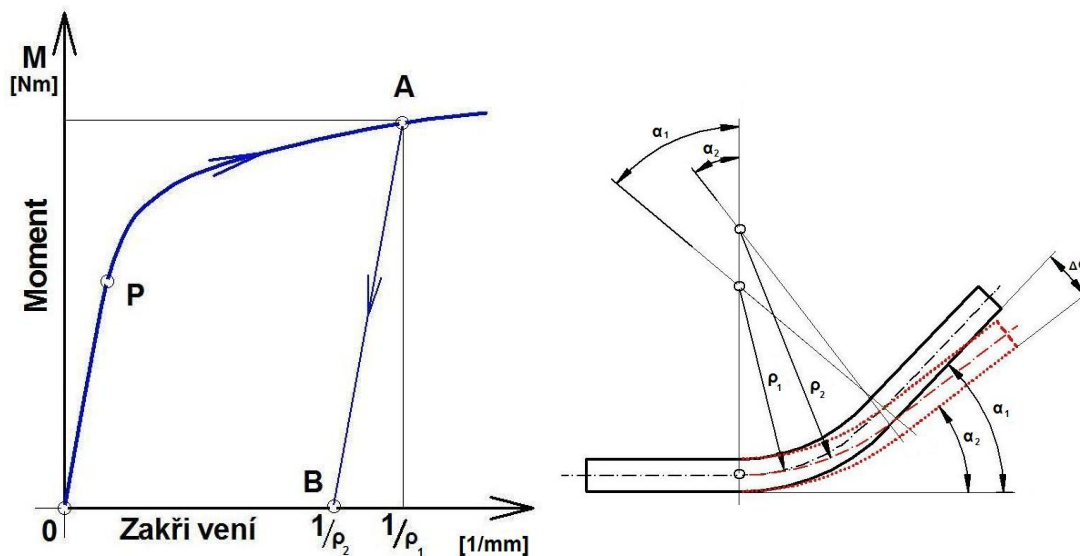
$$\text{Pro úzké tyče: } \Delta\alpha = \frac{M \cdot l}{E \cdot J} = \frac{2 \cdot l \cdot \sigma_{1P}}{t \cdot E} \cdot \frac{180}{\pi} \quad [^\circ] \quad (2.10)$$

$$\text{Pro široké pásy: } \Delta\alpha = \frac{M \cdot l}{E \cdot J} \cdot (1 - \mu^2) = \frac{2 \cdot l \cdot \sigma_{1P}}{t \cdot E} \cdot (1 - \mu^2) \cdot \frac{180}{\pi} \quad [^\circ] \quad (2.11)$$

E ... modul pružnosti v tahu [MPa]

t ... tloušťka materiálu [mm]

M	... ohybový moment [N · mm]
l	... délka neutrální osy v ohybu [mm]
J	... kvadratický moment [mm ⁴]
σ_{1p}	... ohybové napětí v krajních vláknech [MPa]
μ	... Poissonova konstanta [-]
$\Delta\alpha$... úhel odpružení [°]
α_1, α_2	... úhel ohybu před a po odpružení [°]
ρ_1, ρ_2	... poloměr ohybu neutrální osy [mm]



Obr. 2.7: Vlevo závislost mezi ohybovým momentem M a zakřivením $1/\rho$ před a po odlehčení. Vpravo schéma ohybu před a po odlehčení /6/

b) Diagramy pro určení odpružení

Pro praktické určení odpružení existuje mnoho diagramů, a to vždy pro každý konkrétní případ. Pro rozsah této práce nemá smysl sem nějaký uvádět.

2.2.5.3 Moderní metody určení odpružení

Moderní metody určení odpružení můžeme rozdělit na metody simulační a metody kompenzace odpružení při výrobním procesu.

a) Simulační metody

Na trhu jsou zastoupeny softwarem od renomovaných společností jako je například AutoForm nebo ESI Group. Tyto produkty se dají rozdělit do dvou kategorií. Složitější programy slouží pro návrh a vývoj nástrojů plošného tváření, kde podstatně snižují náklady na výrobu nástroje, protože součástí vývoje je i simulace procesu tváření. Díky těmto simulacím odpadá složité a časově náročné doladování již vyrobeného nástroje kvůli odpružení, což šetří finance i čas. Jednodušší programy slouží k ověření tvářitelnosti jednotlivých dílů. Všechny tyto programy při simulacích berou v potaz i vliv odpružení. [11], [12]

b) Kompenzace odpružení při výrobním procesu

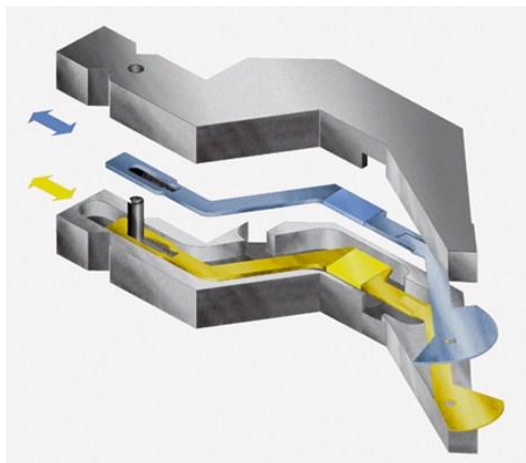
V dnešní době se s výhodou využívá možností ohýbání pomocí CNC ohraňovacích lisů. Díky rozvoji a možnostem CNC ohraňovacích lisů je kladen u těchto strojů velký důraz na automatickou kompenzaci odpružení při ohýbání. Tento problém se řeší osazením měřicího zařízení na lis. Měřicí zařízení a lis pak vzájemně komunikují a tvoří jeden celek. Existuje několik možných řešení měřicí jednotky. [13]

První možností je například systém Easy Form Laser od společnosti LVD (viz. obrázek 2.8). Jedná se o bezkontaktní laserový systém odměřování úhlu. Zařízení měří úhel pomocí laseru z obou stran ohybnice. Měřicí zařízení je upevněno na ohraňovacím lisu tak, aby neblokovalo a neovlivňovalo proces ohýbání. Pracuje ve třech základních režimech. Nejjednodušší režim spočívá v kontrole úhlu ohybu při zadaném odpružení z databáze nebo pomocí obsluhy. V tomto režimu nedochází k časovým prodlevám. Dalším režimem je měření odpružení, kdy se díl nejprve ohne na úhel 95°, poté dojde k uvolnění a měření odpružení. Pak je díl s pomocí naměřených údajů doohnut na požadovaný úhel. Další díly série jsou pak ohýbány rovnou s použitím údajů z prvního ohybu nebo je možné proces opakovat na každý díl. Třetí režim se používá na díly s velkou délkou ohybu. Systém snímá prohnutí dílu na krajích a uprostřed a během procesu upravuje seřízení stroje tak, aby byl úhel ohybu v celé délce dílu stejný. Opět lze naměřené hodnoty aplikovat na další díly série nebo proces opakovat na každý díl. [13]



Obr. 2.8: Ohraňovací lis osazený zařízením Easy Form Laser /13/

Jiným provedením je například patentovaný snímač ACB společnosti Trumpf (viz. obrázek 2.9). Kontaktní snímač je součástí ohýbacího nástroje. Ohraňovací lis ohne materiál pomocí ohybníku na požadovaný úhel. Po té dojde k odlehčení působící síly. Senzor zaznamená odpružení pomocí ramínka s odečítací ploškou (viz. obrázek 2.9 vlevo). Pak dojde k doohnutí materiálu o naměřený úhel odpružení. Stroj automaticky provádí korekci ohybu s přesností 0,3°. Jeden stroj může být osazen několika senzory. [14]



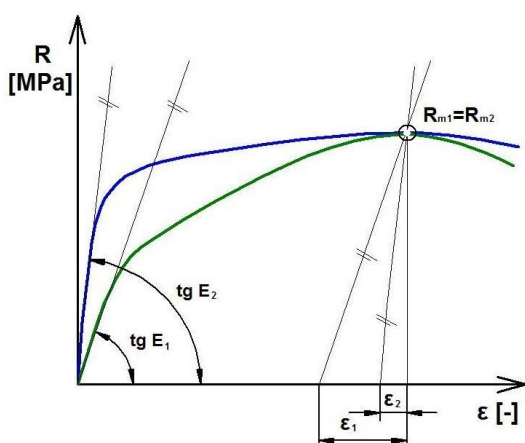
Obr. 2.9: ACB senzor /14/

Výhodou použití těchto systémů oproti standardním metodám nedochází ke zbytečnému znehodnocování materiálu, jelikož není nutné pořizovat zkušební kusy pro měření odpružení, což snižuje náklady a výrobní čas. [13]

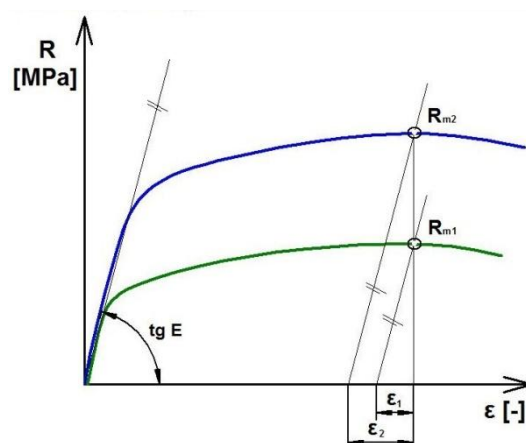
2.2.5.4. Vlivy působící na velikost odpružení

a) Vliv mechanických vlastností

Na velikost odpružení mají vliv vlastnosti tvářeného materiálu, zastoupené jeho mechanickými vlastnostmi jako je modul pružnosti E . Na obrázku 2.10 je graf závislosti napětí na poměrném prodloužení pro dva materiály s rozdílným modulem pružnosti a shodnou mezí pevnosti. Ohýbané materiály jsou zatěžovány do oblasti plastických deformací. Po uvolnění se nepohybují k nulovému napětí přímo, ale dochází k odpružení. Z grafu plyne, že čím nižší modul pružnosti materiál polotovaru má, tím více roste odpružení. [2]



Obr. 2.10: Graf závislosti napětí na poměrném prodloužení pro dva materiály se shodnou velikostí meze pevnosti, ale rozdílným modulem pružnosti /2/



Obr. 2.11: Graf závislosti napětí na poměrném prodloužení pro dva materiály se shodnou velikostí modulu pružnosti, ale rozdílnou pevností /2/



Další mechanickou vlastností ovlivňující odpružení je mez kluzu. Čím vyšší je hodnota meze kluzu, tím větší je i odpružení (viz. obrázek 2.10). Totiž čím vyšší hodnotu v diagramu tahové zkoušky mez kluzu má, tím se zvětšuje i oblast pružných deformací. [2]

Při odpružení je důležitá velikost meze pevnosti materiálu. To můžeme vidět na obrázku 2.11, kde je znázorněn graf závislost napětí na poměrném prodloužení pro dva materiály se shodnou velikostí modulu pružnosti. Modrý s vyšší pevností, zelený s nižší pevností. Ohýbané materiály jsou zatěžovány do oblasti plastických deformací. Po uvolnění se nepohybují k nulovému napětí přímo, ale dochází k odpružení. Jak je v grafu vidět, odpružení u pevnějšího materiálu je větší. [2]

b) Vliv rozměrů materiálu, nástrojů a parametrů ohybu

Kromě výše uvedených mají vliv na odpružení i další parametry. Ze vzorců (2.10) a (2.11) z kapitoly 2.2.5.2. plynou následující závislosti uvedených parametrů na úhlu odpružení (viz. [4], strana 150, [6], strana 60 až 62). [2], [4], [6]

- Velikost úhlu odpružení $\Delta\alpha$
roste při rostoucí hodnotě
 - poloměru ohybu r [mm]
 - úhlu ohybu α [°]
 - Poissonovy konstanty η [-]
 - momentu ohybu M [N · mm]
 - napětí v krajních vláknech σ_{1P} [MPa]
- Velikost úhlu odpružení $\Delta\alpha$
klesá při rostoucí hodnotě
 - tloušťky polotovaru t [mm]
 - modulu pružnosti E [MPa]

Dále platí, že odpružení ovlivňuje způsob ohýbání (zda ohýbáme volně nebo použijeme kalibraci). Při ohýbání s kalibrací nejvíce záleží na velikosti měrného tlaku kalibrace. Vliv na odpružení má také konstrukce ohýbadla (viz. kapitola 2.2.5.5.) [2], [10]

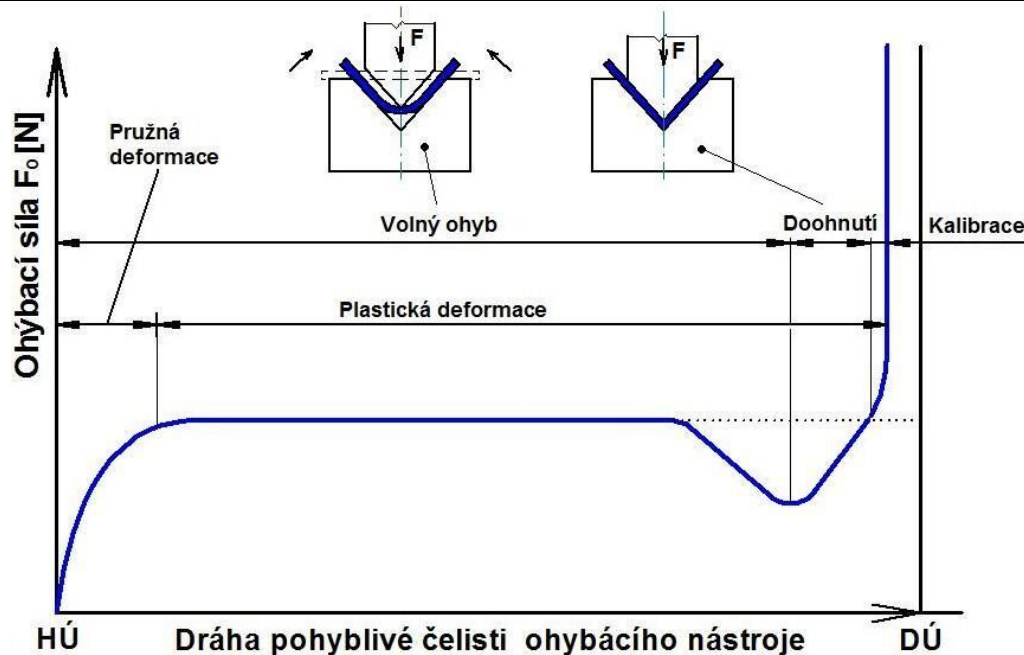
2.2.5.5. Způsoby eliminace odpružení při ohýbání

a) Ohnutí na větší úhel ohybu

Jednoduchým a často využívaným způsobem je ohnutí polotovaru na úhel ohybu zvětšený o úhel odpružení. Docílí se toho, že materiál po ohnutí odpruží pouze o úhel odpružení a výsledný úhel ohybu se zmenší na výkresem požadovaný.

b) Ohýbání s kalibrací

Při strojním ohýbání je častou metodou použití kalibrace, kdy na konci ohybového cyklu je prudce zvýšena působící síla (viz. obrázek 2.12), kde je diagram závislosti ohýbací síly F_0 na dráze ohybníku mezi horní a dolní úvratí. Do vzdálenosti těsně před dolní úvratí se stále jedná o volný ohyb. [5]



Obr. 2.12: Kalibrační diagram /1/

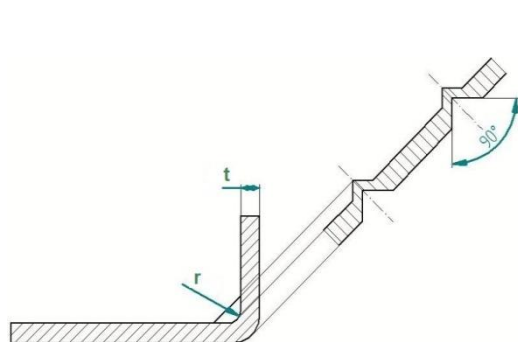
c) Úprava tvaru ohybku

Odpružení lze eliminovat úpravou tvaru ohybku přidáním prolisu v místě ohybu jak ukazuje obrázek 2.13. Prolis pak klade vůči odpružení přirozený odpor. Nevýhodou této úpravy je, že při montáži prolis brání vsazení další součásti do místa ohybu. [15]

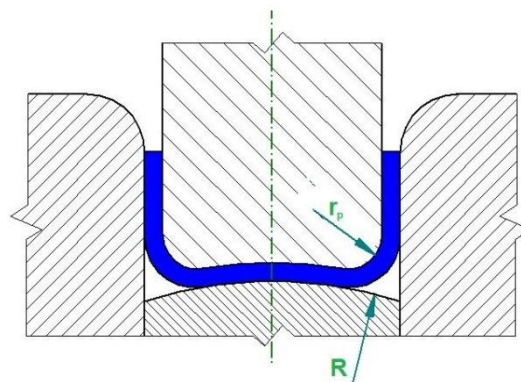
d) Úprava tvaru nástroje

Pro níže uvedené způsoby eliminace odpružení jsou nutné úpravy tvaru ohýbacího nástroje. [15]

- **Pružná deformace dna**, jak ukazuje obrázek 2.14. Deformace dna musí být pouze pružná. Úprava je vhodná pro pružné materiály. [15]



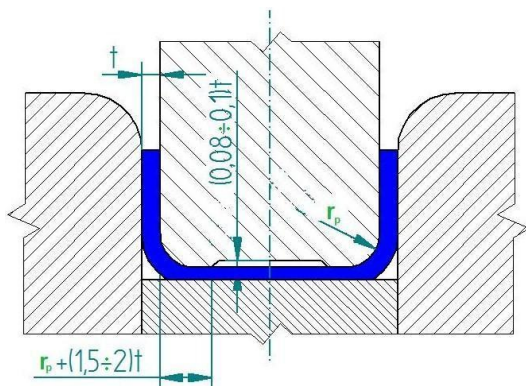
Obr. 2.13: Prolis na výlisku /15/



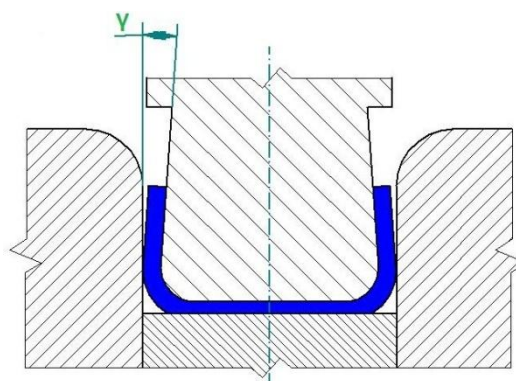
Obr. 2.14: Pružná deformace dna /15/

- Možným způsobem úpravy je opatření ohybníku **razící hranou**, jak je vidět na obrázku 2.15. Díky tomu je materiál v rozích zpevněn rázem ohybníku. [15]

- Dalším způsobem je odlehčení ohýbacího nástroje, a to buď **odlehčení ohybnice** o tloušťku materiálu nebo **podbroušení ohybníku** o úhel γ jak je vidět na obrázcích 2.16 a 2.17. [15]

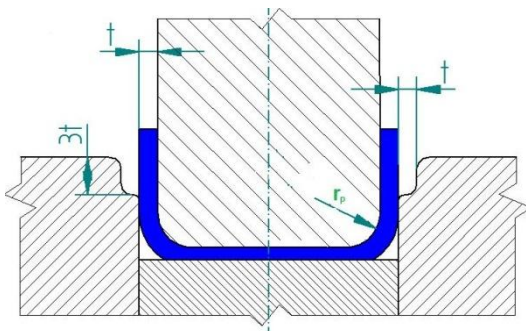


Obr. 2.15: Razící hrana /15/

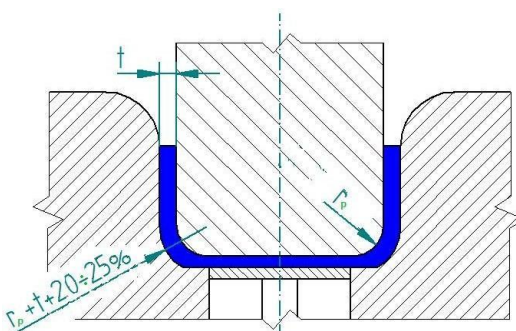


Obr. 2.16: Podbroušení ohybníku /15/

- Způsobem eliminace je také přidání **otočných čelistí** do ohybnice. Ty zajistí lepší přilnutí polotovaru k podbroušenému ohybníku, nebo lze využít **protitlaku** v místě ohybu. [15]
- Další možností je zpevnění materiálu **deformačním poloměrem** v místě ohybu jak ukazuje obrázek 2.18. [15]



Obr. 2.17: Podbroušení ohybnice /15/



Obr. 2.18: Deformační poloměr /15/

2.2.5.6. Závěrečné shrnutí k teorii odpružení

Snahy o eliminaci odpružení při ohýbání nemusí být vždy úspěšné, například z hlediska možností strojního vybavení a podobně. Také výpočty úhlů odpružení je dobré prakticky zkontrolovat zkouškou. Velkou roli hlavně při dlouhodobé sériové výrobě hraje také faktor materiálu, zejména kolísání jeho tloušťky a jeho mechanických vlastností. Proto se stává, že velikost odpružení se mění i při zachování stejných nastavení (seřízení) ohýbadel a ohýbacích strojů. [15]

2.3. Fotogrammetrie

Fotogrammetrie je věda zabývající se zpracováním informací z fotografických snímků. Fotografické snímky slouží jako podklad pro její činnost, jsou nositeli informace. Fotogrammetrie provádí rekonstrukci tvarů, měření rozměrů a určování polohy předmětů zobrazených na fotografických snímcích. Touto technologií lze z fotografií odvodit tvar, velikost, umístění předmětu v prostoru, určit vzájemnou polohu jednotlivých předmětů v prostoru vůči sobě atd. Fotogrammetrie umožňuje popis rovinných i trojrozměrných povrchů v grafické i numerické podobě. Dá se uplatnit všude tam, kde lze zkoumaný objekt vyfotografovat. [16], [17], [18], [19]

Fotogrammetrie spočívá v pořízení snímků (dnes v digitální podobě), jenž se získávají z různých zdrojů (dalekohled, satelit, letecké snímkování, pozemní snímkování, blízké snímkování nebo makro snímkování). Získané snímky se pomocí počítačového vyhodnocení (digitální fotometrie) zpracují. Výsledkem činnosti fotogrammetrie jsou například topografické mapy (zobrazující geografickou realitu) nebo 3D modely objektů atd. Popsaný postup bude prováděn v experimentální části práce. [16], [17], [18], [19]

Tato metoda sběru a vyhodnocení dat je dnes základem všech moderních systémů používaných ve stavebnictví, geodezii, kartografii, strojírenství, medicíně, antropologii, archeologii, při dokumentaci historických objektů, šetření dopravních nehod atd. Výhodou oproti jiným (například geodetickým) metodám je možnost pozdního vyhodnocení. Stačí pořídit pouze fotografie. Použití fotogrammetrie tedy nevyžaduje fyzický kontakt se zkoumaným objektem. [16], [17], [18], [19]

2.3.1. Optické systémy

Fotogrammetrie je základem pro dnešní moderní 3D optické systémy. V této oblasti působí několik renomovaných výrobců, jako například ALICONA, GEOMAGIC nebo GOM. V experimentální části bakalářské práce bude měření a vyhodnocování odpružení prováděno i produkty německé firmy GOM a proto je tato kapitola na její produkty zaměřena. Obecně tyto systémy pracují na principu snímání objektu CCD kamerami nebo digitálními fotoaparáty. Pořízené snímky se posléze odešlou do počítače a pomocí daného softwaru se zpracují a vyhodnotí. Optické systémy se dle účelu použití dělí na dva hlavní proudy. [20], [21], [22]

a) Bezkontaktní optické měřicí systémy

Ty jsou především určeny k 3D měření deformací a k deformačním analýzám - ARAMIS a ARGUS. Patří sem i bezkontaktní optický měřicí systém PONTOS sloužící především k měření kinematických veličin. [20]

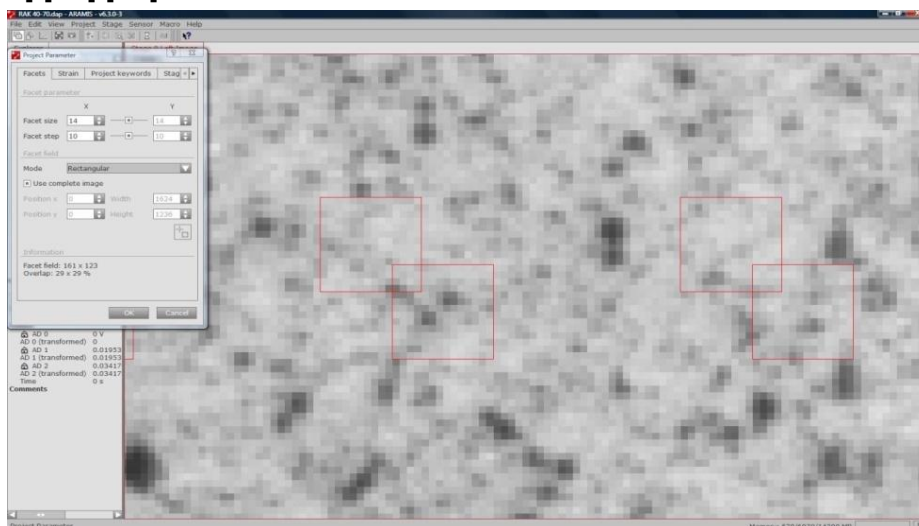
b) Digitalizační (skenovací) optické systémy

Ty slouží k digitalizaci objektů za účelem například porovnání vyrobeného dílu s CAD modelem. Sem patří 3D scanner ATOS a systém TRITOP. Jedná o digitalizační systémy vybavené softwarem pro zpracování. [20]

2.3.1.1. Optický měřicí systém ARAMIS

ARAMIS je bezkontaktní optický měřicí systém od firmy GOM pro měření deformací. Pomáhá především lépe pochopit deformační chování testovaného materiálu při zatěžování. Proces měření může být spouštěn v pravidelných časových intervalech externím signálem (průletovou diodou, ručním ovladačem nebo nastavením spouštěcí hodnoty sledované fyzikální veličiny). [19], [20] [21] [23]

Princip měření spočívá v nanesení stochastického vzoru (patternu) sprejem na testovaný objekt. Pro vytvoření vzoru se nejprve bílou barvou nanese na měřenou oblast vzorku souvislý podklad. Na podklad se z větší vzdálenosti aplikuje sprejem černá akrylátová barva. Tím vznikne stochastický vzor. S takto vytvořeným vzorem je nutné do deseti minut začít měření, protože po delší časové prodlevě by se mohl vzor i s podkladem při zatěžování odlupovat. Systém se před začátkem měření kalibruje pomocí kalibračního panelu. Po započetí měření systém nanesený vzor v dané oblasti měření rozdělí na tzv. fazety o předem daných rozměrech [px]. Plochy fazet jsou zároveň vůči sobě překryty (většinou o cca 30% viz. obrázek 2.19) (nastavení dle požadované přesnosti měření). Při zatěžování se vzor deformuje zároveň s testovaným objektem. Tím se také mění polohy sledovaných fazet. V každé úrovni zatížení (tzv. stage) je testovaný objekt sejmut dvěma CCD kamerami. Z pořízených snímků jsou pomocí image processingu vyhodnoceny polohy jednotlivých fazet. Porovnáním polohy odpovídajících si fazet v jednotlivých okamžicích zatížení se vypočítají 3D posuvy bodů, tímto také tvar deformovaného objektu a 3D deformace. [19], [20] [21] [23]



Obr. 2.19: Obrázek červeně zvýrazněných fazet na měřeném vzorku

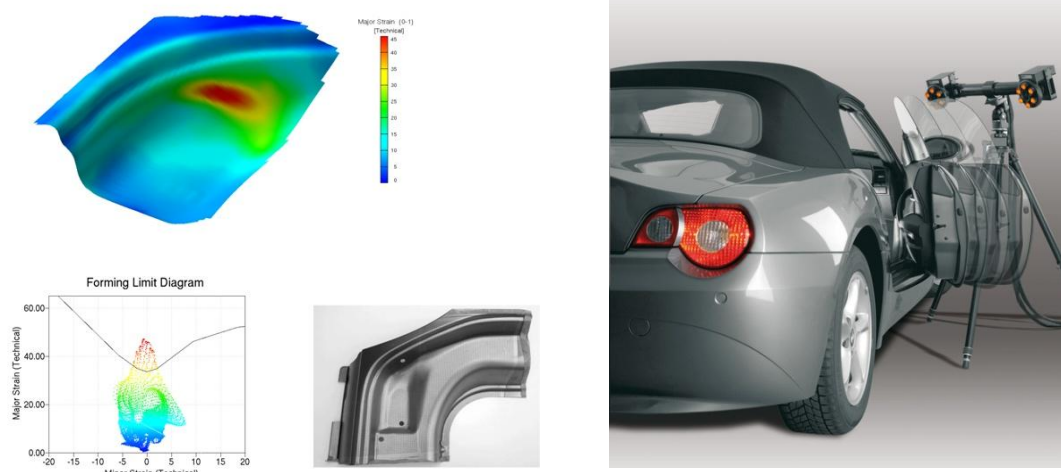
Výstupem měření jsou hodnoty posunutí a rychlosti bodů, deformace a rychlost deformace, tvar objektu v jednotlivých fázích deformace, souřadnice pro sledování polohy v FLC diagramu, grafické nebo tabulkové výstupy naměřených hodnot. Celé měření, vyhodnocení a dokumentace procesu se provádí v rámci integrovaného softwaru ARAMIS. [19], [20] [21] [23]

2.3.1.2. Optický měřicí systém ARGUS

ARGUS je bezkontaktní optický měřicí systém využíváný hlavně pro měření 3D deformací plechu při lisovacím procesu. [20], [21]

Před měřením je na testovaný vzorek elektrochemicky vyleptána mřížka bodů (viz. obrázek 2.20 vlevo) (o rozteči většinou mezi 1 a 6 mm). Mřížka se deformuje zároveň s lisováním plechového dílu. Po vylisování je plech nasnímán digitálním fotoaparátem z různých úrovní a úhlů. K orientaci snímků slouží kalibrační kameny. Ze snímků jsou pomocí image processingu vypočteny 3D souřadnice bodů mřížky. Po té je vypočteno rozložení deformace a souřadnice. Výsledky mohou být zobrazeny například na 3D modelu (viz. obrázek 2.20 vlevo), jako barevná mapa nebo v řezech. [20], [21]

Výstupem z měření jsou hodnoty 3D posunutí, hodnoty deformace, řezy, změny tloušťky materiálu, grafické a tabulkové výstupní protokoly. Celé měření, vyhodnocení a dokumentace procesu se provádí v rámci integrovaného softwaru ARGUS. [20], [21]



Obr. 2.20: Vlevo plechový výlisek vyhodnocený pomocí systému ARGUS, na jeho 3D modelu červenou barvou označena kritická místa deformace. Dole FLD diagram. Vpravo snímání dveří automobilu systémem PONTOS /20/

2.3.1.3. Optický měřicí systém PONTOS

PONTOS je mobilní optický systém pro měření kinematických veličin (souřadnice, rychlosti a zrychlení bodů). Systém je často používán při testovacích měřeních v automobilovém a leteckém průmyslu. [20], [21]

PONTOS je vybaven dvěma kamerami, které jsou synchronizovány a zaznamenávají snímky ve stereo nastavení (viz. obrázek 2.20 vpravo). V těchto snímcích jsou zachyceny a graficky zobrazeny 3D souřadnice referenčních bodů a jejich posunutí v různých deformačních stavech během zatížení objektu. Měřený objekt je označen optickými retro body, které jsou snímány pomocí dvou kamer s CCD čipem. Systém z těchto záběrů vypočítá prostorové souřadnice bodů, jejich rychlosti a zrychlení. Výsledkem jsou 3D souřadnice, absolutní a relativní pohyb bodů. [20], [21]

3. Experimentální část

Experimentální část této práce je věnována měření úhlu odpružení při volném ohybu na vzorcích ocelové tyče obdélníkového průřezu tloušťky $t=5\text{ mm}$ a $t=10\text{ mm}$, šířky $b=20\text{ mm}$ z oceli 11 375 (S235JR, viz. příloha 5 a 6) pomocí dvou bezkontaktních optických měřících systémů, konkrétně pomocí bezkontaktního měřícího systému ARAMIS (viz. kapitola 2.3.1.1.) a pomocí vyhodnocovacího softwaru Image-Pro plus.

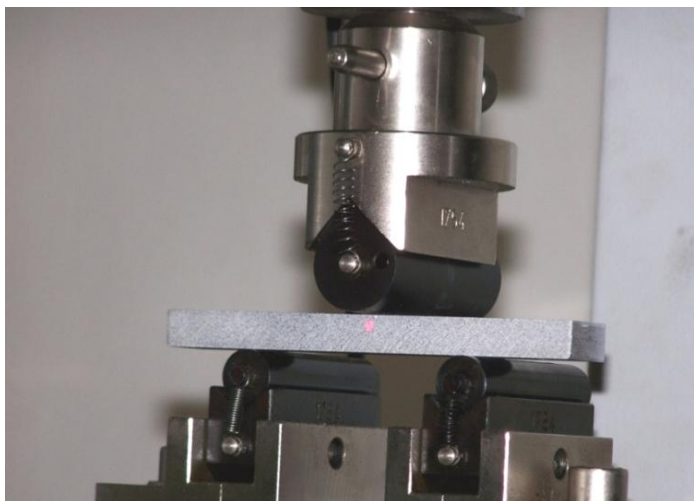
Cílem je ověření možnosti použití optických bezkontaktních měřících systémů pro měření velikosti úhlu odpružení a zároveň porovnání takto získaných hodnot s hodnotami získanými výpočtem z charakteristiky zatěžování ze zatěžovacího stroje.

Obě zkoušky probíhaly v prostorách laboratoří katedry strojírenské technologie. Při obou zkouškách sloužil k zatěžování vzorků trhací stroj TIRA test 2300 (viz. obrázek 3.2) ovládaný pomocí PC softwaru.

3.1. Měření a vyhodnocení pomocí systému ARAMIS

Cílem první metody bylo ověření možnosti měření velikosti úhlu odpružení pomocí optického bezkontaktního systému ARAMIS. Trhací stroj byl řízen PC softwarem a pomocí něho nastaven tak, aby testovaný vzorek zatěžoval cyklicky. To znamená, že vzorek byl zatížen určitou předem v softwaru nastavenou maximální silou. Jakmile této maximální síly trhací stroj dosáhl, vzorek byl odlehčován a hodnota působící síly začala klesat. Po odlehčení se celý cyklus opakoval (viz. příloha 1 a 2). Na vzorku $t=5\text{ mm}$ bylo provedeno 11 zatěžovacích cyklů, na vzorku $t=10\text{ mm}$ 8 zatěžovacích cyklů.

Měření bylo prováděno pouze na dvou kusech vzorků, protože z nasnímaných dat bylo možné díky cyklickému zatěžování změřit několik úhlů ohybu (z nich posléze vypočíst jednotlivé úhly odpružení).



Obr. 3.1: Vzorek v prizmatickém přípravku

Na obrázku 3.1 je vidět pohyblivý stůl trhacího stroje TIRA test 2300, na kterém byl umístěn prizmatický ohýbací přípravek s nastavitelnou roztečí podpor. V pevném rámu stroje byl uložen zkušební ohýbací nástroj.

3.1.1. Průběh zkoušky

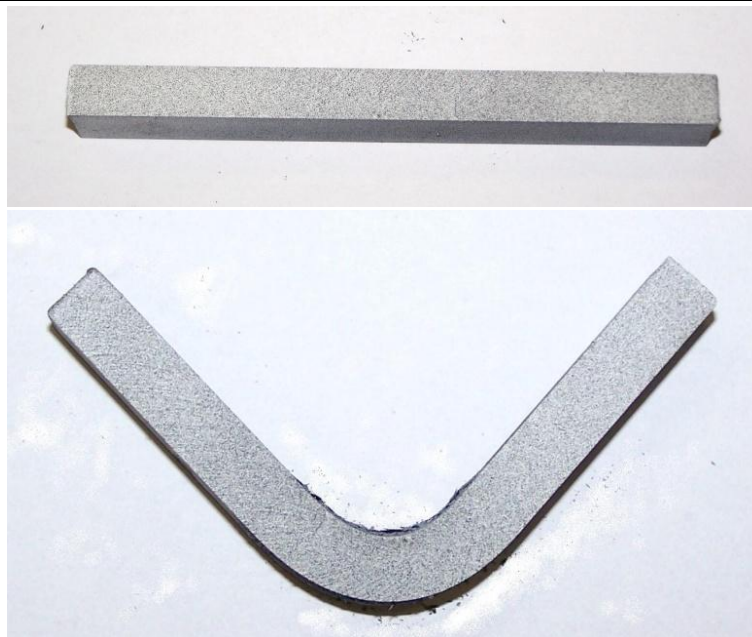
1) Nejprve byl připraven optický měřicí systém (viz. obrázek 3.2) . Ten se skládal ze dvou kamer s CCD čipem umístěných na rámu z hliníkového profilu. Mezi kamerami byl umístěn zdroj laserového paprsku. Systém byl upevněn na nastavitelném stativu a ustaven proti snímané oblasti (tj. proti prizmatickému přípravku). Stativ musel být vyrovnán v obou vodorovných osách. Celé ustavení velmi usnadňoval laser, sloužící k nastavení přesné vzdálenosti polohy snímacího zařízení vůči snímané oblasti, která byla nastavena v řídicím softwaru.



Obr. 3.2: Trhací stroj a CCD kamery

2) Dále byl optický systém zkalibrován pomocí kalibrační desky. Samotná kalibrace byla po krocích řízena pomocí softwaru, který obsluže přímo určoval polohy a natočení kalibrační desky v jednotlivých krocích. V každém kroku (poloze) byla deska sejmuta a software vyhodnotil viditelnost jednotlivých pomocných bodů vyobrazených na desce. Kalibrace byla úspěšná, pokud na snímku byly viditelné všechny pomocné body.

3) Před zkouškou byly vzorky označeny. Příprava vzorku pro snímání optickým systémem ARAMIS spočívala v odmaštění povrchu vzorku a nanesení bílé akrylátové barvy pomocí spreje na snímanou oblast. Na bílý podklad byla pak z větší vzdálenosti pomocí spreje nanesena černá akrylátová barva. Tím vznikl stochastický vzor (pattern, viz. obrázek 3.3). S takto připraveným vzorkem bylo nutné co nejdříve začít zkoušku, jinak by se mohlo stát, že by po delším zasychání barva na vzorku při zatěžování praskala a tím by byla celá zkouška znehodnocena.



Obr. 3.3: Vzorek před a po zkoušce

4) Při zkoušce byl vzorek pomocí trhačího stroje cyklicky zatěžován a zároveň byl snímán pomocí optického systému ARAMIS. Před zkouškou na neoznačeném vzorku bylo třeba určit přibližný čas trvání zkoušky tak, aby bylo možno vhodně nastavit snímací frekvenci kamer, jelikož systém ARAMIS má omezenou kapacitu snímků z jednoho měření. Snímací frekvence je nastavitelná.

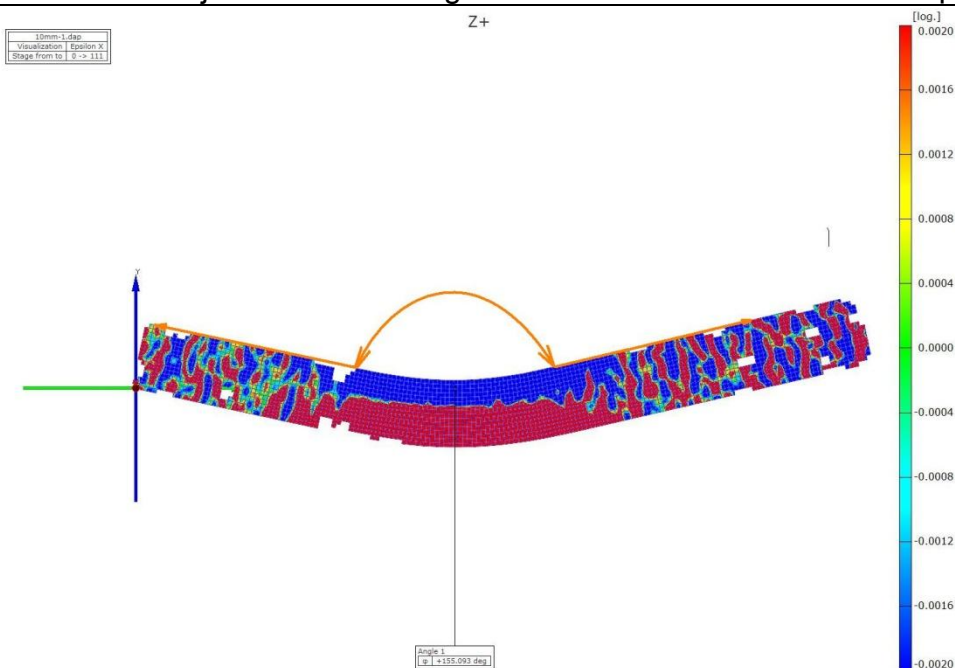
3.1.2. Zpracování výsledků zkoušky

Jednou z výhod systémů pracujících na principu fotogrammetrie (viz. kapitola 2.3.) je možnost zpětného zpracování dat. Pořízené snímky byly přeneseny do počítače a následně zpracovány pomocí integrovaného softwaru ARAMIS.

Zpracování spočívalo v načtení pořízených snímků z obou kamer do softwaru. Ten pro každý stage sjednotil snímky z pravé a levé kamery a vytvořil tak reálný obraz. Do softwaru byl zároveň importován graf závislosti zatěžující síly na čase zkoušky, který přesně odpovídal časovému sledu pořízení snímků. Graf a jednotlivé snímky spolu v rámci softwaru komunikovaly.

Proto bylo odměřování úhlů jednoduchou záležitostí. Z grafu závislosti zatěžující síly na čase byl pro jednotlivé cykly určen vždy snímek (stage) s největším zatížením (největší působící silou) ze kterého byl odměřován úhel ohnutí β_1 a snímek (stage) s nejmenším zatížením (nejmenší působící silou), ze kterého byl odměřován úhel ohnutí β_2 (viz. obrázek 3.4). Schéma rozložení úhlů ohnutí a úhlů ohybu je na obrázku 3.14.

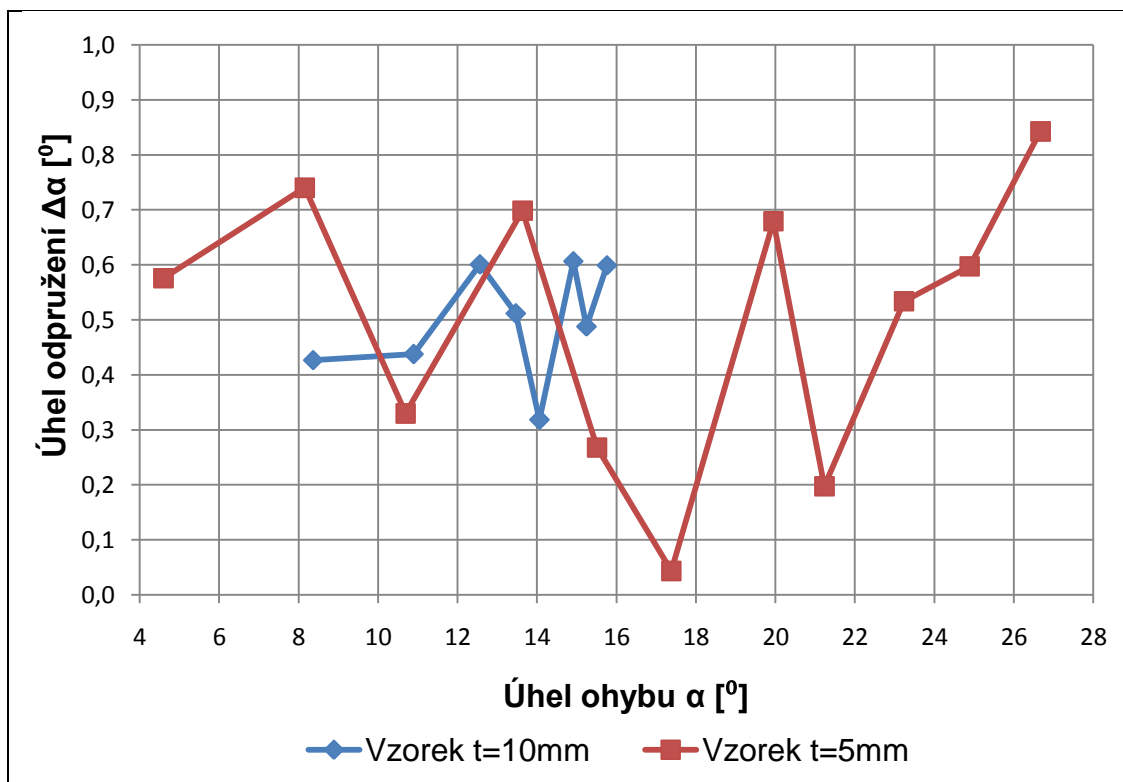
Ve skutečnosti byly pro každý stage odměřovány úhly několikrát a to jak na horní tak i dolní hraně vzorku.



Obr. 3.4: Měření úhlů ohnutí β pomocí integrovaného softwaru ARAMIS

3.1.3. Vyhodnocení výsledků zkoušky

Z několika naměřených hodnot úhlů ohnutí β_1 respektive β_2 pro každý stage byly vypočteny aritmetické průměry těchto hodnot. Z těch pak byly vypočteny příslušné úhly ohybu α_1 respektive α_2 a úhel odpružení $\Delta\alpha$ dle závislostí plynoucích z obrázku 3.14. Pomocí těchto hodnot byl zpracován graf na obrázku 3.5 (závislosti úhlu odpružení $\Delta\alpha$ na úhlu ohybu α_1).



Obr. 3.5: Graf závislosti úhlu odpružení $\Delta\alpha$ na úhlu ohybu α_1

Z grafu na obrázku 3.5 je zřejmé, že hodnoty odpružení pro oba typy měřených vzorků nevykazují žádnou logickou závislost, nebo trend. Po analýze průběhu měření bylo konstatováno, že uvedenou metodiku zatěžování vzorků (cyklickým zatěžováním) nelze v tomto uspořádání použít. Při cyklickém zatěžování totiž nedochází k úplnému odlehčení ohýbaných vzorků (viz. příloha 1 a 2). Odpružení tedy bylo potlačováno stále působícím ohybníkem. Z tohoto důvodu není možné výsledky zkoušky hodnotit jako směrodatné a dobré.

Samotný princip zkoušky týkající se nastavení softwaru trhačního stroje byl chybný. V možnostech softwaru není nastavit zatěžovací cyklus tak, aby byl vzorek při zkoušce ohybem vždy úplně odlehčen.

Kvůli nemožnosti použití získaných výsledků z grafu na obrázku 3.5 byla zvolena jiná metoda zkoušky (viz. kapitola 3.2.).

3.2. Měření a vyhodnocení pomocí softwaru Image-Pro plus

Cílem zkoušky bylo určit správné údaje úhlu ohnutí β_2 po odlehčení působící ohýbací síly, jelikož výsledky dosažené první zkouškou (viz. kapitola 3.1.) nebyly použitelné. Bylo tedy rozhodnuto provést zkoušku novou tak, aby bylo dosaženo odpovídajících výsledků.

Tato zkouška byla provedena na větším počtu vzorků (jejich parametry jsou uvedeny v tabulce 3.11). Vzorky byly ze stejného materiálu a se stejnými rozměry jako vzorky použité při první zkoušce (viz. příloha: 5 a 6), Hlavní rozdíl oproti první zkoušce spočíval v tom, že software trhačního stroje byl nastaven tak, aby trhační stroj zatěžoval vzorek pouze do určité nastavené hodnoty průhybu y_{MAX} (viz. příloha 3 a 4).

Ke snímání průběhu zkoušky byl tentokrát využit digitální zrcadlový fotoaparát. Zkouška byla vyhodnocena v softwaru Image-Pro plus.

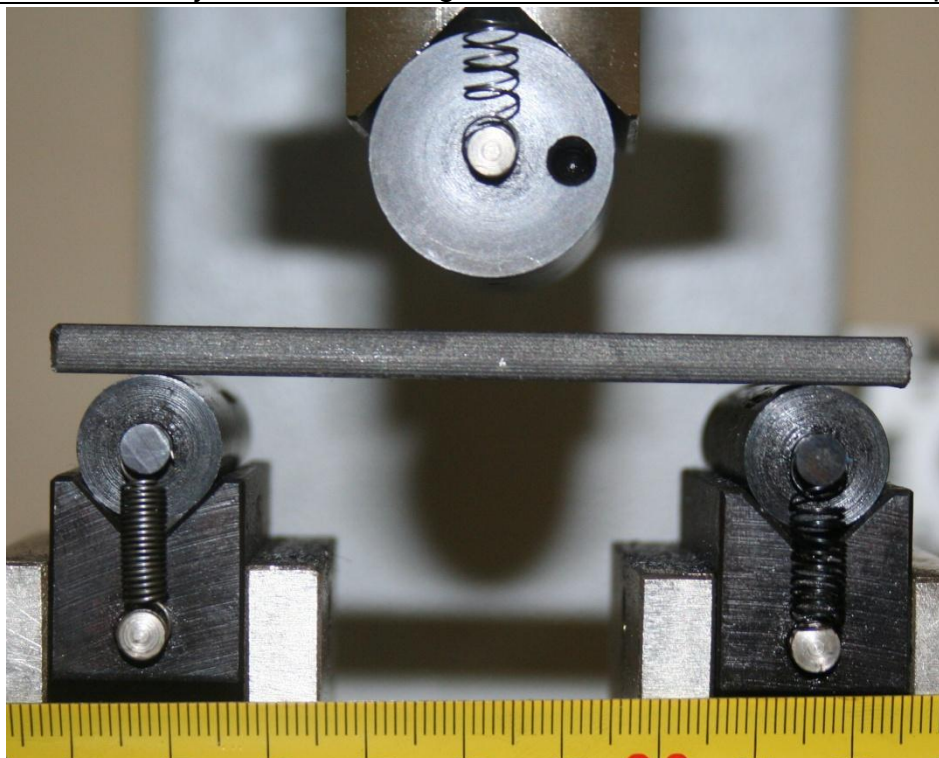
3.2.1. Průběh zkoušky

Níže popsaná příprava na zkoušku byla mnohem jednodušší než v prvním případě, protože nebylo nutno připravovat optický měřicí systém ARAMIS a odpadlo také nanesení patternu na vzorky.

1) Na trhační stroj byl umístěn stejný prizmatický přípravek (rozteč přípravku viz. tabulka 3.15) a zkušební ohýbací nástroj jako při první zkoušce. Přípravek i nástroj byly opět osazeny válečky pro snížení tření mezi vzorkem a nástrojem respektive přípravkem (viz. obrázek 3.6).

2) Před prizmatickým přípravkem byl umístěn digitální zrcadlový fotoaparát upevněný na stativu. Stativ s fotoaparátem byl nasměrován tak, aby byl ve stejné výšce jako prizmatický přípravek z důvodu pořízení kvalitních a nezkreslených fotografií. Na fotoaparátu byla nastavena zpožděná spoušť.

3) Nejprve byly prováděny zkoušky pro vzorky $t = 5$ mm, po té pro vzorky $t = 10$ mm.



Obr. 3.6: Upevnění prizmatický přípravek a zkušební ohýbací nástroj

Zkouška probíhala tak, že vzorek byl vždy vyfocen digitálním fotoaparátem v pozici maximálního nastaveného průhybu, po té byl vzorek odlehčen a znovu vyfocen. Z jedné zkoušky daného vzorku byly pořízeny dva snímky. První snímek k odečtení úhlu ohnutí při zatížení β_1 , druhý k odečtení úhlu ohnutí při odlehčení β_2 .

Tato zkouška byla časově náročnější než první, jelikož byl ohýbán větší počet vzorků.

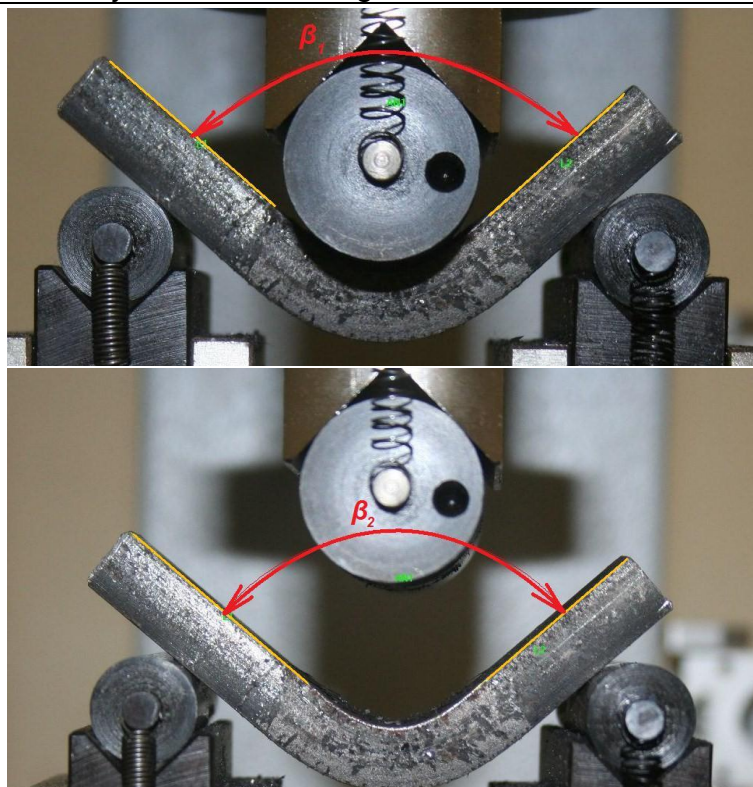
3.2.2. Zpracování výsledků zkoušky

Výstupem ze zkoušky byly fotografické snímky vzorků při zatížení a odlehčení. Z každého snímku bylo nutno odečíst příslušné úhly ohnutí. K tomu sloužil vyhodnocovací software Image-Pro plus.

Software Image-Pro plus slouží zejména k měření rozměrů předmětů z digitálních fotografií v příslušném rozlišení. Aby rozměry získané pomocí softwaru Image-Pro plus odpovídaly skutečnosti, bylo třeba nejprve software kalibrovat (pomocí měřítka, viz. obrázek 3.6).

V našem případě mohla sloužit ke kalibraci kterákoli pořízená fotografie, protože s fotoaparátem se během zkoušky nehýbalo.

Při zpracování snímků (viz. obrázek 3.7) byl údaj úhlu ohnutí β_1 respektive β_2 měřen vždy několikrát na obou hranách vzorku. Z těchto hodnot byl stanoven aritmetický průměr zapsaný v tabulce 3.8.

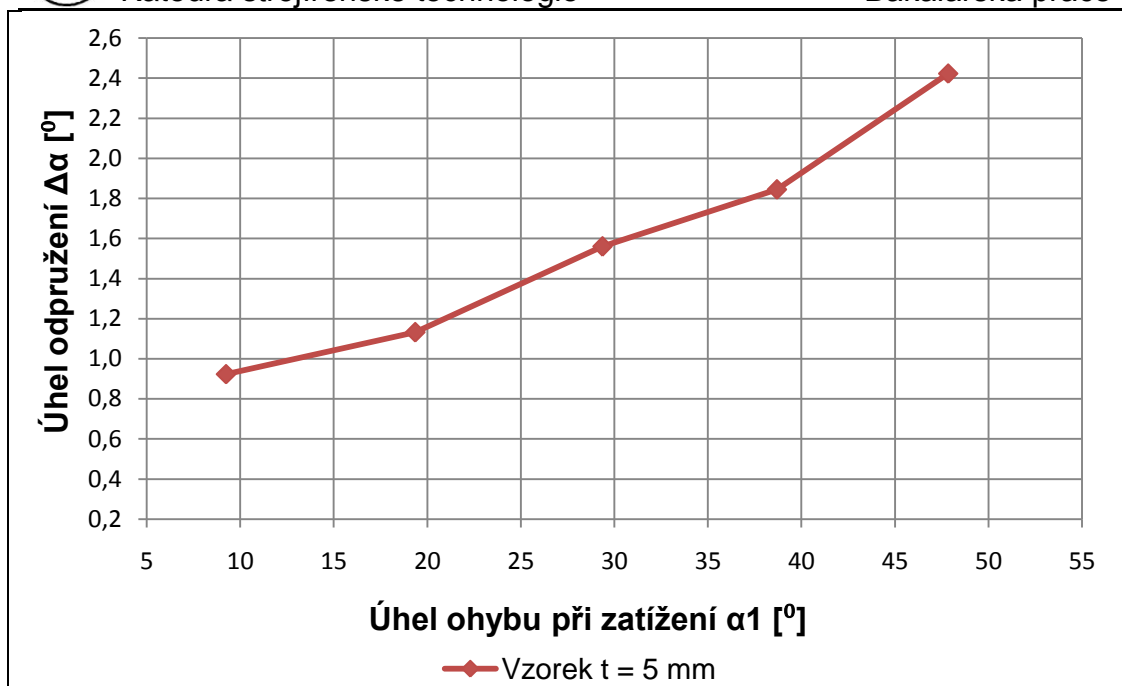


Obr. 3.7: Nahoře měření úhlu ohnutí β_1 při zatížení, dole β_2 při odlehčení

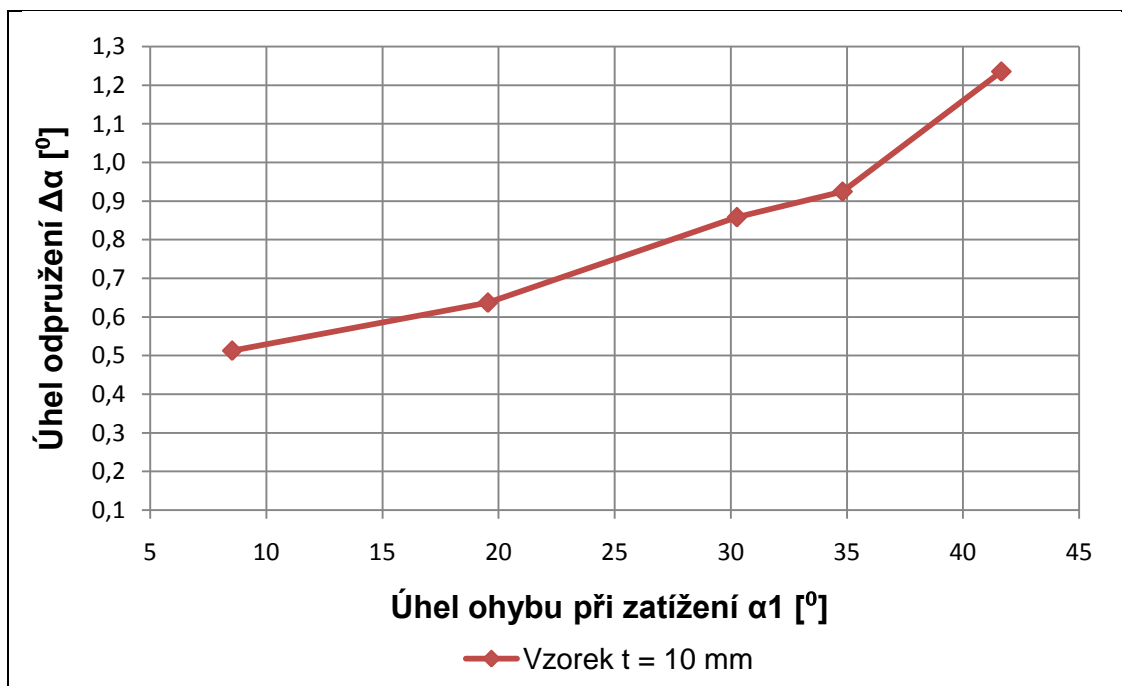
3.2.3. Vyhodnocení výsledků zkoušky

Tab. 3.8: Výsledky měření softwarem Image-Pro plus. V tabulce jsou pod označením β_1 a β_2 zaneseny průměrné naměřené hodnoty.

Vzorky t = 5 mm				
-	Měření		Výpočet	
Číslo vzorku	Úhel uhnutí β_1 [°]	Úhel ohnutí β_2 [°]	Úhel ohybu α_1 [°]	Úhel odpružení $\Delta\alpha$ [°]
5	161,5	163,3	9,3	0,9
10	141,3	143,5	19,4	1,1
15	121,3	124,4	29,4	1,6
20	102,6	106,3	38,7	1,8
25	84,3	89,2	47,8	2,4
Vzorky t = 10 mm				
-	Měření		Výpočet	
Číslo vzorku	Úhel uhnutí β_1 [°]	Úhel ohnutí β_2 [°]	Úhel ohybu α_1 [°]	Úhel odpružení $\Delta\alpha$ [°]
5	163,0	164,0	8,5	0,5
10	140,9	142,2	19,5	0,6
15	119,5	121,2	30,3	0,9
17	110,4	112,2	34,8	0,9
20	96,7	99,2	41,7	1,2



Obr. 3.9: Graf závislost úhlu odpružení $\Delta\alpha$ na úhlu ohybu α_1 pro vzorek $t = 5$ mm



Obr. 3.10: Graf závislost úhlu odpružení $\Delta\alpha$ na úhlu ohybu α_1 pro vzorek $t = 10$ mm

Pomocí údajů z tabulky 3.8 byly sestaveny grafy na obrázcích 3.9 a 3.10. Z grafů jasně vyplývá, že s rostoucím úhlem ohybu roste i úhel odpružení. Jelikož byly zkoušky provedeny na malém počtu vzorků, nebylo možné s určitostí stanovit trend křivky. Pro stanovení trendu by bylo třeba provést více zkoušek (více bodů v grafu).



3.2.4. Výpočet hodnot ze zatěžovacího stroje

Zdrojem dat pro výpočet úhlu odpružení byly údaje o průběhu zkoušky získané (exportem do programu MS Excel) z protokolu o průběhu zkoušky. Pro účely výpočtu byly použitelné pouze údaje o maximální ohybové síle F_{MAX} při maximálním průhybu y_{MAX} (hodnoty z každého protokolu jsou uvedeny v tabulce 3.18).

Z hodnot uvedených v tabulce 3.18 bude prováděn výpočet úhlu odpružení pro jednotlivé vzorky, a to pomocí vzorců (2.10) a (2.11) uvedených v kapitole 2.2.5.2. v teoretické části této práce. Tyto vztahy byly převzaty z [6], strana 60 až 62. Jedná se o obecné vztahy pro výpočet úhlu odpružení, které nijak nezohledňují podmínkám zkoušky, vlastnosti materiálu vzorků ani rozměry vzorků použité při zkoušce v této bakalářské práci. Vztahy (2.10) a (2.11) jsou použity pouze za účelem hrubého ověření naměřených úhlů odpružení.

Pro úzké tyče:
$$\Delta\alpha = \frac{M \cdot l}{E \cdot J} \cdot \frac{180}{\pi} \quad [^\circ] \quad (2.10)$$

Pro široké pásy:
$$\Delta\alpha = \frac{M \cdot l}{E \cdot J} \cdot (1 - \mu^2) \cdot \frac{180}{\pi} \quad [^\circ] \quad (2.11)$$

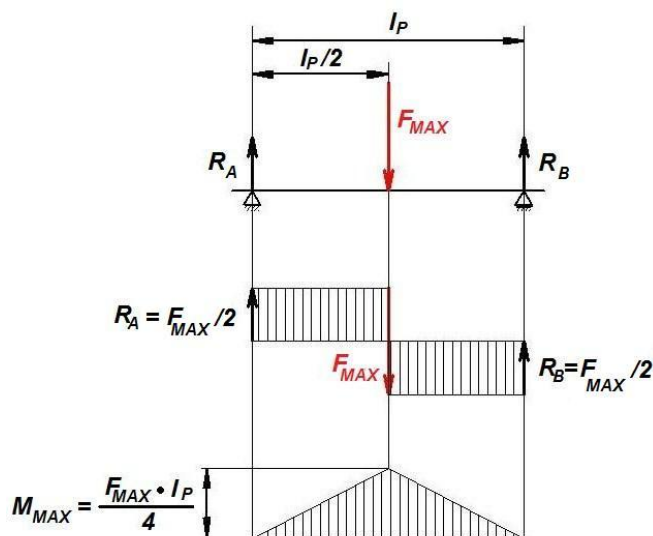
Vzhledem k rozměrům průřezů vzorků (viz. tabulka 3.11) bude pro vzorek $t = 5 \text{ mm}$ ($b > 3 \cdot t$) použit vzorec (2.10) a pro vzorek $t = 10 \text{ mm}$ ($b < 3 \cdot t$) bude použit vzorec (2.11).

Tab. 3.11: Rozměry vzorků

Vzorky = 5 mm			
Číslo vzorku	Tloušťka t [mm]	Šířka b [mm]	Porovnání rozměrů
5	5,00	20,22	$b > 3 \cdot t$
10	5,01	20,21	$b > 3 \cdot t$
15	5,06	20,18	$b > 3 \cdot t$
20	5,00	20,24	$b > 3 \cdot t$
25	5,03	20,20	$b > 3 \cdot t$
Vzorky $t = 10 \text{ mm}$			
Číslo vzorku	Tloušťka t [mm]	Šířka b [mm]	Porovnání rozměrů
5	10,10	20,16	$b < 3 \cdot t$
10	10,07	20,22	$b < 3 \cdot t$
15	10,03	20,22	$b < 3 \cdot t$
17	10,09	20,26	$b < 3 \cdot t$
20	10,06	20,23	$b < 3 \cdot t$

Ohýbaný (tvářený) vzorek byl pro potřeby výpočtu zjednodušeně chápán jako nosník uložený na dvou podporách (válečky prizmatického přípravku) uprostřed zatížený silou od zkušebního ohýbacího nástroje. Ve zkoumané poloze vzorku s hodnotou průhybu y_{MAX} působí na nosník (vzorek) příslušná ohybová síla F_{MAX} . Jak ukazuje rozbor na obrázku 3.12,

největší ohybový moment připadá právě na působíště síly F_{MAX} . Ohybový moment způsobený silou F_{MAX} se vypočítá podle vzorce (3.1).



Obr. 3.12: Rozbor sil a momentů při volném ohybu

Maximální ohybový moment: $M_{MAX} = \frac{F_{MAX} \cdot l_p}{4} \quad [N \cdot mm] \quad (3.1)$

M_{MAX} ... maximální ohybový moment $[N \cdot mm]$ (viz. tabulka 3.18)

F_{MAX} ... maximální ohýbací síla $[N]$ (viz. tabulka 3.18)

l_p ... rozteč prizmatického přípravku $[mm]$ (viz. tabulka 3.15)

Protože součástí prizmatického přípravku i ohýbacího nástroje byly válečky sloužící ke snížení tření (viz. obrázek 3.7), měnilo se v průběhu ohybu rameno ohybu $l_p/2$. Proto nebylo možné matematicky odvodit vztah pro výpočet úhlu ohnutí $\beta_1/2$ pouze ze známých údajů (rozteč prizmatického přípravku l_p , průhyb y_{MAX}). Proto byla k určení úhlu ohnutí $\beta_1/2$ použita grafická metoda, spočívající ve schematickém zakreslení každého vzorku v pozici průhybu y_{MAX} , kde byl hledaný úhel odměřen. Toto bylo provedeno v softwaru Solid Edge. Vzhledem k tomu, že převzaté vzorce (2.10) a (2.11) byly použity pouze pro ověření údajů měření a vzhledem k tomu, že uvažují velikost ramene ohybu jako konstantu, byla za velikost ramene ohybu dosazována hodnota $l_p/2$.

Poslední neznámou veličinou potřebnou k výpočtu je délka neutrální osy l . Ta lze vypočítat ze vzorce (2.1) uvedeného v kapitole 2.2.3. Přesnější však bude použití údajů z Bakalářské práce (Langer J.: Rozložení deformace materiálu při volném ohybu, TU v Liberci, 2011. [24]), strana 37 až 38, tabulka 4.9.4 a 4.9.7. (použité údaje viz. tabulka 3.18). V experimentální části uvedené práce bylo provedeno měření míry posunutí neutrální osy (pracovní označení n_o $[mm]$) vůči ose polotovaru pomocí bezkontaktního optického měřicího systému ARAMIS, a to i na vzorcích o shodném průřezu a ze shodného materiálu jako jsou vzorky zkoušené a posuzované v této kapitole.



Proto bude výhodnější použít tyto údaje, jelikož jsou přesnější než použití koeficientu posunutí neutrální osy x .

Tab. 3.13: Tabulka pro výpočet míry posunutí neutrální osy /24/

Vzorek 5 mm													
Čas [s]	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	55	60	61
Počet měření NO [mm]													
1.	2,5	2,52	2,52	2,43	2,27	2,27	2,11	2,01	2,03	1,86	1,86	1,78	1,78
2.	2,5	2,52	2,52	2,43	2,36	2,27	2,11	2,04	2,03	1,86	1,86	1,78	1,7
3.	2,5	2,6	2,52	2,43	2,27	2,27	2,11	2,04	2,03	1,95	1,86	1,7	1,7
Aritmetický průměr	2,5	2,55	2,52	2,43	2,3	2,27	2,11	2,03	2,03	1,89	1,86	1,75	1,73
tloušťka mat. [mm]													
1.	5	4,99	4,97	4,96	4,97	4,98	4,96	4,71	4,77	4,71	4,79	4,71	4,63
2.	5	4,99	4,97	4,99	4,97	4,97	4,96	4,92	4,77	4,79	4,71	4,6	4,55
3.	5	5	4,99	4,96	4,99	4,97	4,95	4,9	4,87	4,79	4,79	4,63	4,63
Aritmetický průměr	5	4,99	4,98	4,97	4,98	4,97	4,96	4,84	4,80	4,76	4,76	4,65	4,60
Úhel ohybu [°]	0	4,12	10,54	17,2	24,3	32	38,95	50	55,3	61,04	68,62	81,41	82,53
Vzorek 10 mm													
Čas [s]	0	5	10	20	30	35	40	45	48	50	52	61	62
Počet měření NO [mm]													
1.	5	4,87	4,71	4,39	4,06	3,9	3,65	3,57	3,44	3,44	3,29	3,28	3,28
2.	5	4,71	4,55	4,39	3,98	3,82	3,57	3,41	3,44	3,28	3,33	3,12	3,12
3.	5	4,79	4,55	4,22	3,82	3,65	3,66	3,57	3,36	3,2	3,29	3,04	3,03
Aritmetický průměr [mm]	5	4,79	4,60	4,33	3,95	3,79	3,63	3,52	3,41	3,31	3,30	3,15	3,14
tloušťka mat. [mm]													
1.	10	9,83	9,83	9,83	9,67	9,51	9,51	9,51	9,36	9,28	9,12	9,04	9,04
2.	10	9,75	9,75	9,72	9,6	9,67	9,51	9,43	9,28	9,04	9,09	9,04	9,12
3.	10	9,83	9,75	9,72	9,59	9,59	9,53	9,43	9,04	9,12	9,06	9,12	9,04
Aritmetický průměr [mm]	10	9,80	9,78	9,76	9,62	9,59	9,52	9,46	9,23	9,15	9,09	9,07	9,07
Úhel ohybu [°]	0	3,33	9,79	23,58	39,04	47,79	58,83	63,28	67,34	71,61	73,91	88,05	88,05

S využitím údajů z tabulky 3.13 bude podle obrázku 3.14 platit pro výpočet délky neutrální osy vzorec (3.2).

$$l = 2 \cdot \alpha_1 \cdot \rho_1 = 2 \cdot \alpha_1 \cdot (r + n_0) \quad [mm] \text{ (viz. tabulka 3.18)} \quad (3.2)$$

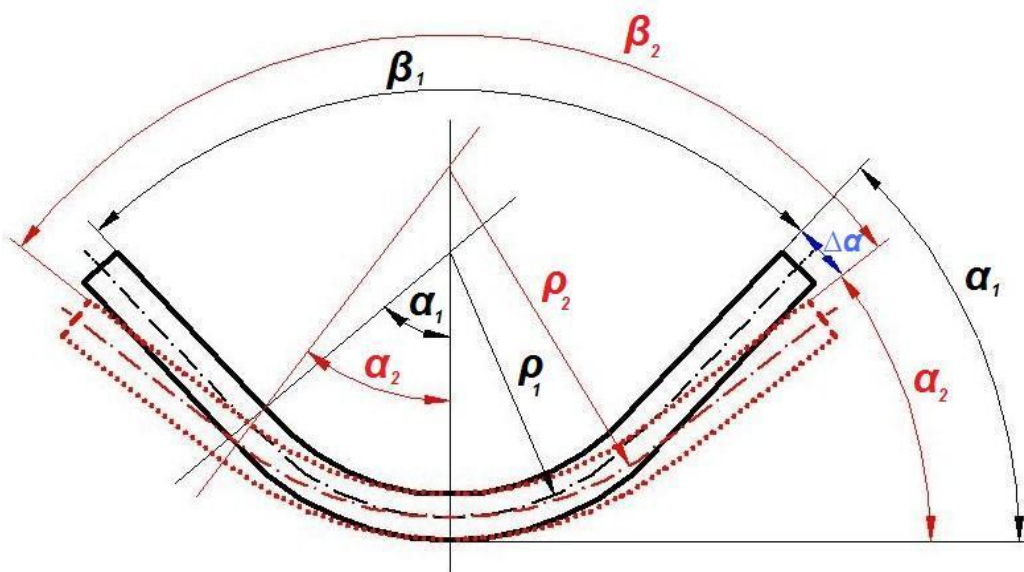
l ... délka neutrální osy v ohybu [mm]

α_1 ... úhel ohybu při zatížení [rad]

ρ_1 ... poloměr zaoblení neutrální osy v ohybu při zatížení [mm]

r ... poloměr ohybu (daný ohýbacím nástrojem) [mm]
(viz. tabulka 3.16)

n_0 ... posunutí neutrální osy [mm]



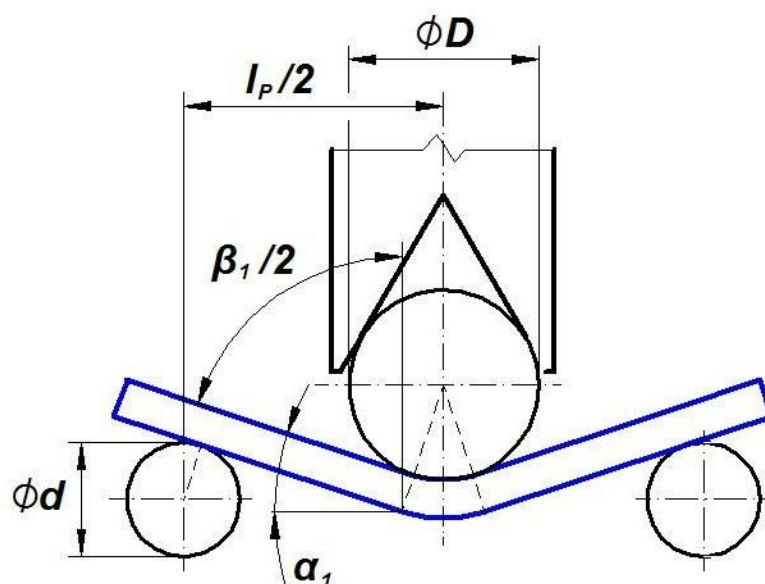
Obr. 3.14: Schéma rozložení jednotlivých úhlů

Tab. 3.15: Naměřené vzdálenosti podpěr

Číslo měření	1	2	3	Průměrná hodnota
l_p [mm]	68,46	68,52	68,50	68,49

Tab. 3.16: Rozměry prizmatického přípravku a ohýbacího nástroje

Průměr válečku v ohybníku ϕD	25 [mm] $\Rightarrow r = 12,5$ [mm]
Průměr válečku v prizmatickém přípravku ϕd	15 [mm]


Obr. 3.17: Schéma grafického odvození úhlu ohnutí $\beta_1/2$ pomocí softwaru Solid Edge

Tab. 3.18: Tabulka vypočtených hodnot

Vzorky t = 5 mm								
Číslo vzorku	F_{MAX} [N]	y_{MAX} [mm]	M_{MAX} [N · mm]	n_0 [mm]	$\beta_1/2$ [°]	α_1 [°]	l [mm]	$\Delta\alpha$ [°]
5	3181	5	54465	2,53	81,2	8,8	4,61	0,30
10	3790	10	64894	2,44	71,7	18,3	9,55	0,73
15	4099	15	70178	2,30	61,8	28,2	14,57	1,17
20	4088	20	70000	2,27	52,1	37,9	19,56	1,61
25	4232	25	72468	2,11	43,1	46,9	23,91	2,01
Vzorky t = 10 mm								
Číslo vzorku	F_{MAX} [N]	y_{MAX} [mm]	M_{MAX} [N · mm]	n_0 [mm]	$\beta_1/2$ [°]	α_1 [°]	l [mm]	$\Delta\alpha$ [°]
5	13318	5	228041	4,60	81,1	8,9	5,32	0,19
10	16327	10	279559	4,40	71,1	18,9	11,13	0,49
15	18171	15	311124	4,33	60,3	29,7	17,45	0,87
17	18596	17	318412	4,20	55,8	34,2	19,94	1,00
20	18908	20	323744	3,98	49,0	41,0	23,56	1,21

Úhel odpružení byl získán dosazením hodnot uvedených v tabulce 3.18 do vzorců (2.10) a (2.11). Za veličinu Poissnovy konstanty byla dosazena hodnota $\mu = 0,3$ [–], za veličinu modulu pružnosti hodnota



$E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ [MPa]}$, za veličinu kvadratického momentu $J = \frac{b \cdot t^3}{12} \text{ [mm}^4\text{]}$.

Vypočtené úhly odpružení jsou uvedeny také v tabulce 3.18.

3.2.5. Porovnání výsledků zkoušky

V této kapitole budou porovnány výsledky z kapitol 3.2.3. a 3.2.4. Pomocí hodnot z tabulky 3.8 a 3.18 byly zkonstruovány grafy závislosti úhlu odpružení $\Delta\alpha$ na úhlu ohybu α_1 .

Tab. 3.19: Porovnání naměřených a vypočtených hodnot úhlu odpružení

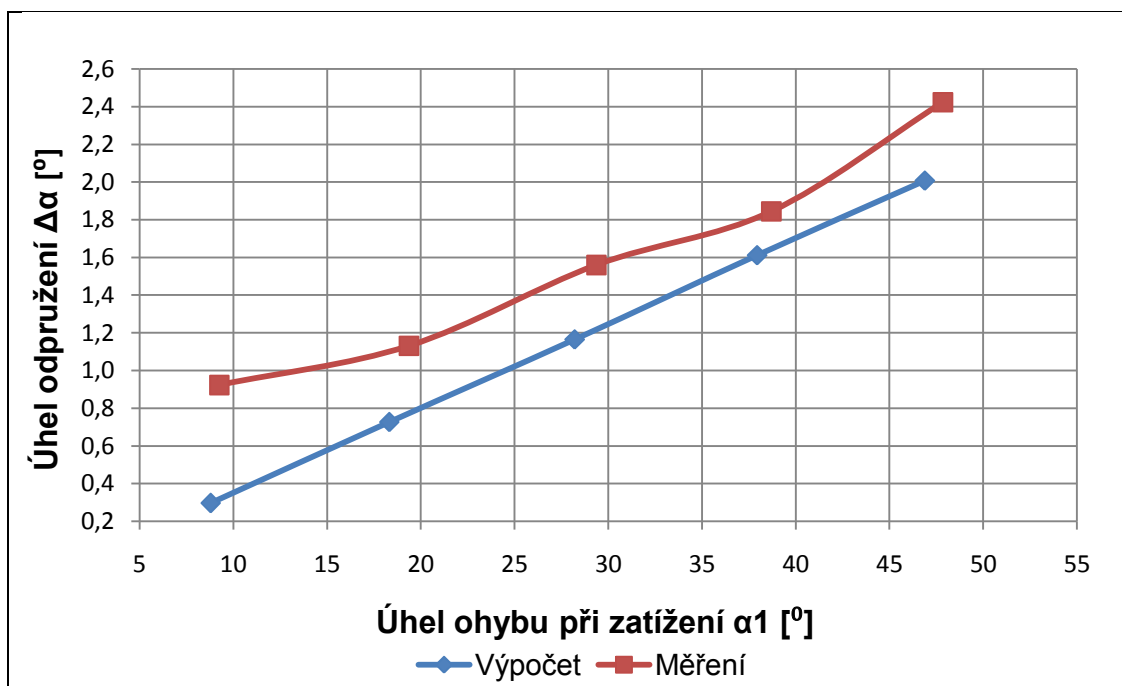
Vzorky t = 5 mm				Vzorky t = 10 mm			
Číslo vzorku	Úhel odpružení $\Delta\alpha$ [°]		Odchylka [%]	Číslo vzorku	Úhel odpružení $\Delta\alpha$ [°]		Odchylka [%]
	Změřený	Spočtený			Změřený	Spočtený	
5	0,9	0,30	66,7	5	0,5	0,19	62,0
10	1,1	0,73	33,6	10	0,6	0,49	18,3
15	1,6	1,17	26,9	15	0,9	0,87	3,3
20	1,8	1,61	10,6	17	0,9	1,00	- 11,1
25	2,4	2,01	16,2	20	1,2	1,21	- 0,8
Průměrná odchylka [%]			25,6	Průměrná odchylka [%]			19,1

Pro úplnost byly do tabulky vloženy hodnoty procentuálních odchylek. Při jejich výpočtu byly brány naměřené hodnoty jako závazné (100%). Odlišnost mezi hodnotami naměřenými a vypočtenými je pak dána procentuální hodnotou. V tabulce 3.19 dole je pak vypočtena průměrná procentuální odchylka pro každý vzorek. Z těchto hodnot vyplývá, že se naměřené a vypočtené hodnoty v průměru liší maximálně o 19%, respektive 26% což může být považováno jako vcelku úspěšné.

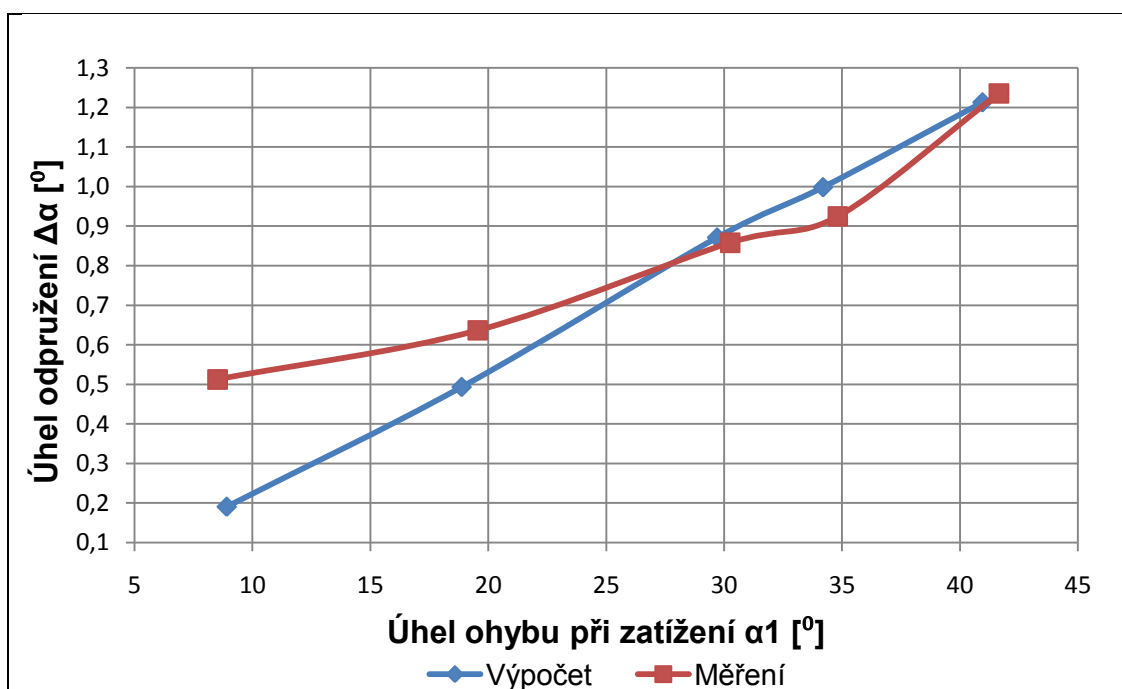
Největší odchylky jsou patrné u průhybu $y_{MAX} = 5 \text{ mm}$, což může být způsobeno použitým výpočtem, protože tato odchylka je značně velká u obou vzorků. Aby bylo možno předpokládat nějaký trend odchylek, bylo by nutno provést více zkoušek, což ale nebylo cílem této práce. Ostatní hodnoty průhybů mají odchylky přijatelné, a to i pokud vezmeme v úvahu, že k výpočtu byly použity vzorce převzaté z odborné literatury, které nebyly nijak uzpůsobeny pro podmínky zkoušek.

Pro větší přehlednost výsledků byly z hodnot v tabulce 3.19 zkonstruovány grafy (viz. obrázek 3.20 a 3.21). Grafy ukazují závislost úhlu odpružení na úhlu ohybu, zároveň vzájemně graficky porovnávají jednotlivé hodnoty.

Z grafů na obrázcích 3.20 a 3.21 vyplývá, že pro zkoušené vzorky v naměřeném rozsahu úhlů ohybu platí, že s rostoucím úhlem ohybu roste také velikost úhlu odpružení. Grafy nebylo možno proložit odpovídajícím trendem, jelikož pro jeho určení není v grafu dostatečný počet bodů (nebyl proveden dostatečný počet zkoušek). Na to, aby bylo možno grafy trendem proložit by bylo třeba provést větší škálu zkoušek (více dat = přesnější určení trendu). Z tabulky 3.19 také vyplývá, že čím větší je úhel ohybu vzorku, tím menší je hodnota odchylky naměřených a vypočtených hodnot odpružení.



Obr. 3.20: Závislost úhlu odpružení $\Delta\alpha$ na úhlu ohybu α_1 pro vzorek $t=5\text{mm}$



Obr. 3.21: Závislost úhlu odpružení $\Delta\alpha$ na úhlu ohybu α_1 pro vzorek $t=10\text{mm}$

4. Závěr

Cílem bakalářské práce bylo ověření možnosti použití bezkontaktních systémů při měření úhlu ohybu. Pro rozsah práce plně postačovalo ověření těchto možností na obecných zkušebních vzorcích. Nebylo třeba pracovat s konkrétními díly (vzorky) z praxe.

V experimentální části práce byly ověřeny možnosti použití dvou odlišných bezkontaktních optických měřících systémů k měření úhlu odpružení při volném ohybu. Oba systémy se od sebe lišily jak principem snímáním zkoušky, tak i způsobem vyhodnocení dat.

Při první zkoušce byl k měření odpružení použit bezkontaktní optický měřící systém ARAMIS. Při této zkoušce však nebylo dosaženo požadovaných výsledků. Jak se později při úvaze ukázalo, chyba byla způsobena řídícím softwarem zkušebního stroje, který nedokázal vzorek při zkoušce úplně odlehčit a také nedokázal udržet přesné parametry zatěžující síly (pravděpodobně kvůli setrvačnosti pohybujících se částí stroje a prodlevy vzniklé přenosem informací ze snímače do softwaru zkušebního stroje). V důsledku toho byla data úhlu ohnutí po odlehčení chybná a touto chybou byla celá zkouška znehodnocena a získaná data pro účely této práce byla nepoužitelná. To není důvodem, proč by nebylo možné použít bezkontaktní systém ARAMIS pro měření úhlu odpružení. Z pořízených snímků bylo možno změřit jednotlivé úhly dobře a přesně. Software navíc poskytoval i informace o rozložení deformace. Tímto softwarem by bylo možno velmi dobře určit posunutí neutrální osy, jelikož je na snímcích dobře viditelná. Pokud by zatěžovací stroj fungoval při zkoušce správně, jistě by byly výsledky měření úhlu odpružení dobré.

Jelikož však nebyla první zkouška úspěšná, bylo posléze přistoupeno k provedení zkoušky druhé. Byl zkoušen větší počet vzorků. Zkouška byla snímána digitálním zrcadlovým fotoaparátem. Vyhodnocení zkoušky bylo provedeno pomocí softwaru Image-Pro plus. Výsledky druhé zkoušky byly porovnány s hodnotami vypočtenými pomocí vzorců převzatých z odborné literatury. Překvapivě bylo zjištěno, že porovnávané hodnoty úhlů odpružení se liší jen velmi málo a mají stoupající trend. Odlišnosti mezi hodnotami ale nelze úplně eliminovat, jsou dány přesností měření i použitými vzorci, které jsou pouze obecné.

Z vyhodnocení výsledků druhé zkoušky také plyne (pro zkoušený materiál ve zkoumaném rozsahu úhlů ohybu), že velikost úhlu odpružení roste s rostoucí hodnotou velikosti úhlu ohybu. To koresponduje s teorií v kapitole 2.2.5.4., obrázek 2.11. Graf zobrazuje závislosti napětí na poměrném prodloužení. Na grafu je vidět, že s rostoucí hodnotou celkové deformace (průhybu) roste i složka pružné deformace způsobující odpružení.

Z výše uvedeného vyplývá, že oba použité bezkontaktní systémy jsou k měření odpružení vhodné. Výhodami obou systémů pracujících na principu fotogrammetrie je to, že není nutné být ve fyzickém kontaktu s měřeným



objektem. Stačí tedy, aby někdo pořídil fotografie. Tyto fotografie (data) pak mohou být uloženy a zpracovány až s časovým odstupem, a to na úplně jiném místě jiným člověkem. Výhodou systému ARAMIS je například i to, že lze ze snímků pozorovat i průběh deformace a zjistit tak například extrémně namáhaná místa, najít polohu neutrální osy v ohybu atd.).

Pokud porovnáme oba systémy, snímání pomocí digitálního fotoaparátu pro software Image-Pro plus bylo uživatelsky snazší, ke snímání nebylo třeba téměř žádného příslušenství. Oproti tomu systém ARAMIS měl výhodu při zpracování, protože v jeho možnostech byla vyšší přesnost měření úhlů.

Pro potřeby této bakalářské práce byl rozsah provedených měření dostačující. K přesnějšímu stanovení trendu odpružení v grafech 3.20 a 3.21 by bylo vhodné provést větší počet zkoušek, a to i na materiálech o větší tloušťce, případně i o jiném materiálovém složení.



5. Seznam použité literatury

- [1] – LENFELD P.: Technologie II. – 1.část (tváření kovů). Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009. ISBN 978-80-7372-466-5
- [2] – PETRUŽELKA J. – BŘEZINA R.: Tvařitelnost kovových materiálů. Ostrava: Vysoká škola báňská-Technická univerzita Ostrava, 2001.
- [3] – VELES P.: Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov. Bratislava: ALFA, 1989
- [4] – HAŠEK V.: Teorie a metodika tváření, Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1965.
- [5] – ROMANOVSKIJ V.P.: Příručka pro lisování za studena. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1959
- [6] – MARCINIAK Z.: Teorie tváření plechů. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1964. ISBN 04-275-64
- [7] – KOLEKTIV: ASM Handbook Volume 8. Mechanical Testing and Evaluation, ASM International 2000. ISBN 978-0-87170-389-7
- [8] – PROCHÁZKA J. – ZAPOTIL M. – NĚMEC M. – NOVOTNÝ J.: Technologie slévání, tváření a svařování, Praha: České vysoké učení technické, 1990. ISBN 80-01-00345-0.
- [9] – HLUCHÝ M. – KOLOUCH J. – PAŇÁK R.: Strojírenská technologie 2, 1.díl, Polotovary a jejich technologičnost, 2.upravené vydání. Praha: Scientia, 2001. ISBN 80-7183-244-8.
- [10] – KIRSCHNER V.: Stanovení vlivu mechanických hodnot materiálu na velikost odpružení, [Bakalářská práce]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009.
- [11] - <<http://www.mmspektrum.com/clanek/akademie-tvareni-pocitacova-podpora-v-technologickych-procesech.html>>, listopad 2011
- [12] - <<http://www.mmspektrum.com/clanek/simulace-hlubokeho-tazeni-plechu.html>>, listopad 2011
- [13] - <<http://www.mmspektrum.com/clanek/presne-a-produktivni-ohybani-plechu.html>>, listopad 2011
- [14] - <<http://www.trumpf-machines.com>>, listopad 2011



[15] – HOLINA J.: Určení mezních stavů velikosti odpružení při ohýbání pevnostního plechu, [Diplomová práce]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2003.

[16] - <<http://www.geodis.cz>>, říjen 2011

[17] - VOLEK A.: Metodika ustavení souřadného systému pro optické měřicí zařízení Pontos, [Diplomová práce]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2008.

[18] - <http://www.techartis.cz/TA_2006/11_Sindelar/11_Sindelar.htm>, říjen 2011

[19] - SOBOTKA J.: Formability of TWIP Material and its, Evaluation by Optical Systems. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2010.
ISBN 978-80-7372-681-2

[20] – <<http://www.mcae.cz>>, říjen 2011

[21] - <<http://www.gom.com>>, říjen 2011

[22] - <<http://www.westcam.cz>>, říjen 2011

[23] - POSPÍCHAL D.: Využití optického systému ARAMIS při určování mezních stavů deformace hlubokotažného plechu, [Diplomová práce]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009.

[24] - LANGER J.: Rozložení deformace materiálu při volném ohybu, [Bakalářská práce]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2011

[25] - Materiálové listy a technická firemní dokumentace



6. Seznam příloh

- Příloha 1: Graf závislosti zatěžující síly na prodloužení vzorku pro první zkoušku, vzorek tloušťky $t = 5 \text{ mm}$.
- Příloha 2: Graf závislosti zatěžující síly na prodloužení vzorku pro první zkoušku, vzorek tloušťky $t = 10 \text{ mm}$.
- Příloha 3: Graf závislosti zatěžující síly na prodloužení vzorků pro druhou zkoušku, vzorky tloušťky $t = 5 \text{ mm}$
- Příloha 4: Graf závislosti zatěžující síly na prodloužení vzorků pro druhou zkoušku, vzorky tloušťky $t = 5 \text{ mm}$
- Příloha 5: Inspekční certifikát pro vzorek tloušťky $t = 5 \text{ mm}$, /25/
- Příloha 6: Inspekční certifikát pro vzorek tloušťky $t = 10 \text{ mm}$, /25/

Příloha 1: Graf závislosti zatěžující síly na prodloužení vzorku pro první zkoušku, vzorek tloušťky $t = 5 \text{ mm}$.

CYKlickÁ ZKOUŠKA V OHYBU

-

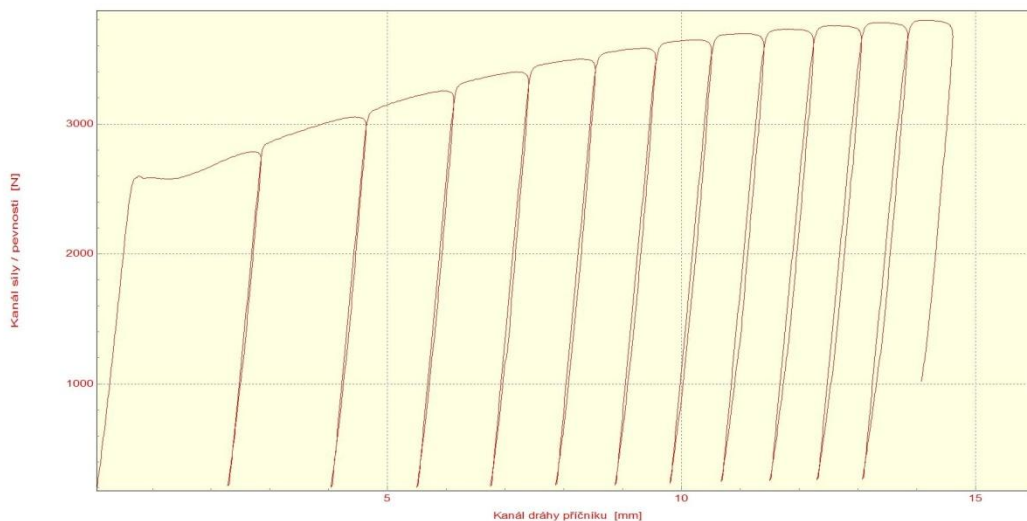
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : S235JR
Norma: : Cyklická zkouška ohybem
Rozměr vzorku: : $t = 5 \text{ mm}$
Rychlost zatěžování: : 20 mm/min
Vypracoval: : Jan Dostál
Datum zkoušky: : 20.11.2011
Podmínky měření: : ---

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky
1

Statistická hodnota
Počet zkoušek
Průměrná hodnota
Směrodatná odchylka



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

Příloha 2: Graf závislosti zatěžující síly na prodloužení vzorku pro první zkoušku, vzorek tloušťky $t = 10$ mm.

CYKlickÁ ZKOUŠKA V OHYBU

-

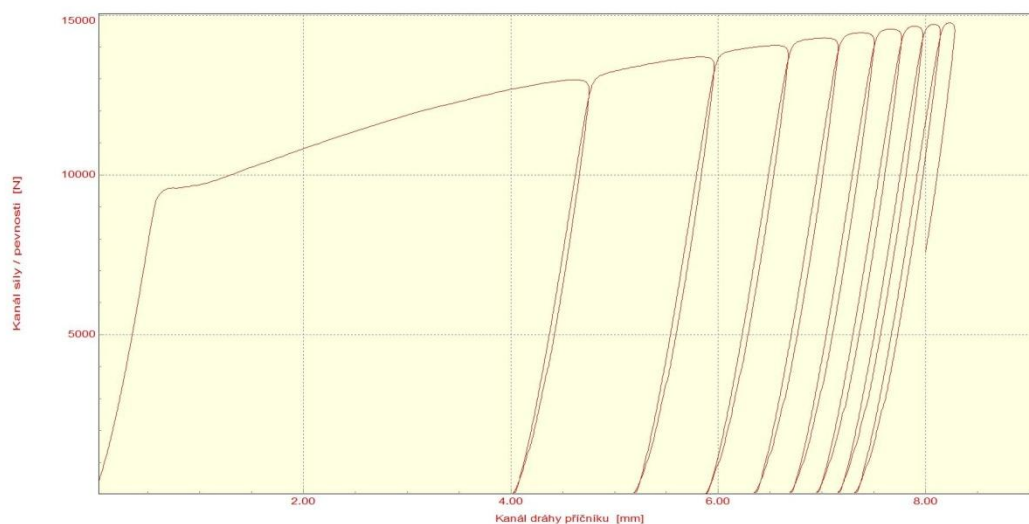
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : S235JR
Norma: : Cyklická zkouška ohybem
Rozměr vzorku: : $t = 10$ mm
Rychlost zatěžování: : 20 mm/min
Vypracoval: : Jan Dostál
Datum zkoušky: : 20.11.2011
Podmínky měření: : ---

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky
1

Statistická hodnota
Počet zkoušek
Průměrná hodnota
Směrodatná odchylka



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

Příloha 3: Graf závislosti zatěžující síly na prodloužení vzorků pro druhou zkoušku, vzorky tloušťky $t = 5 \text{ mm}$

ZKOUŠKA V OHYBU

-

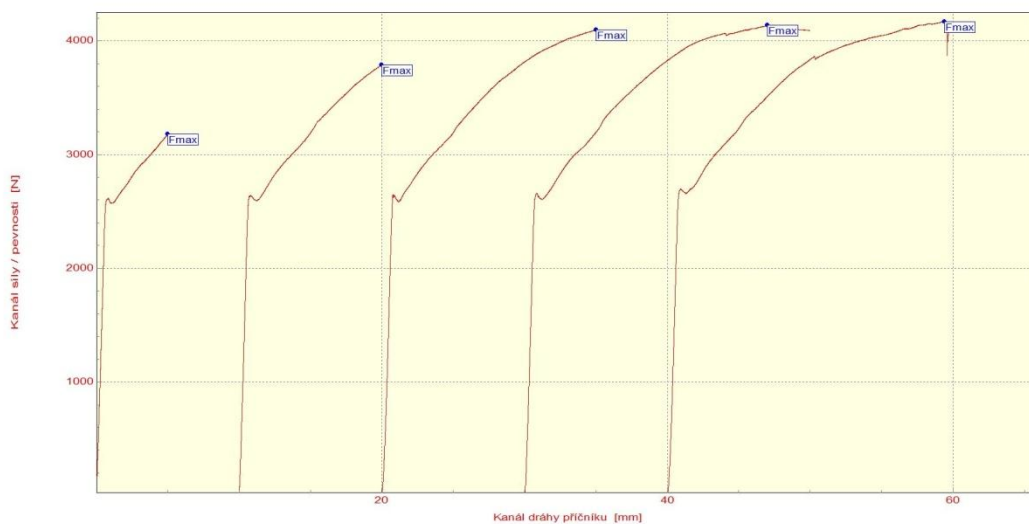
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál : S235JR
Norma : Zkouška ohybem
Rozměr vzorku : $t = 5 \text{ mm}$
Rychlost zatěžování : 10 mm/min
Vypracoval : Jan Dostál
Datum zkoušky : 7. 12. 2011
Podmínky měření : Vzdálenost podpor: 68 mm

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Číslo vzorku	Fmax N
1	5	3180.90
2	10	3790.40
3	15	4099.20
4	20	4138.30
5	25	4169.30

Statistická hodnota	Fmax N
Počet zkoušek	5
Průměrná hodnota	3875.84
Směrodatná odchylka	417.00



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

Příloha 4: Graf závislosti zatěžující síly na prodloužení vzorků pro druhou zkoušku, vzorky tloušťky $t = 10 \text{ mm}$

ZKOUŠKA V OHYBU

-

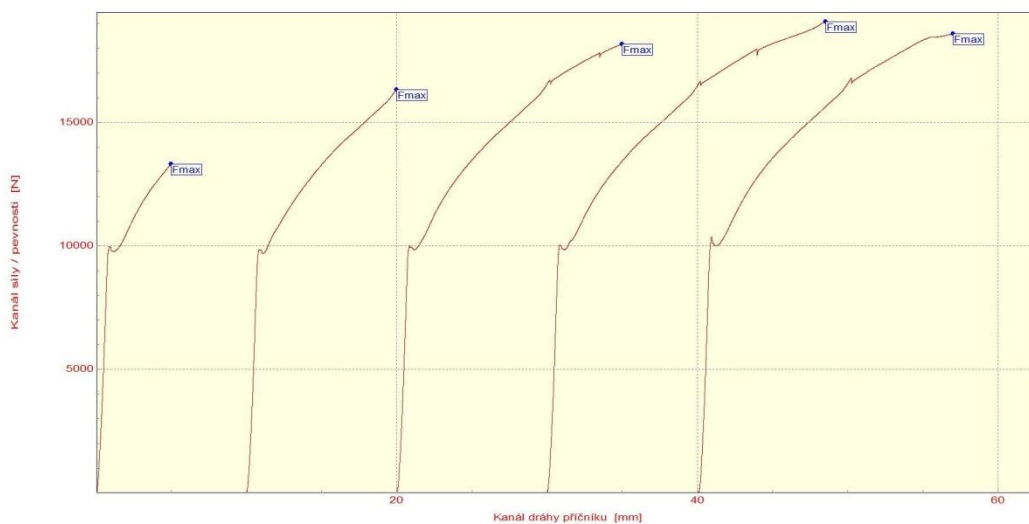
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál : S235JR
Norma : Zkouška ohybem
Rozměr vzorku : $t = 10 \text{ mm}$
Rychlost zatěžování : 10 mm/min
Vypracoval : Jan Dostál
Datum zkoušky : 7. 12. 2011
Podmínky měření : Vzdálenost podpor: 68 mm

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Číslo vzorku	Fmax N
1	5	13318.20
2	10	16327.00
3	15	18171.10
4	20	18908.20
5	17	18596.10

Statistická hodnota	Fmax N
Počet zkoušek	5
Průměrná hodnota	17099.58
Směrodatná odchylka	2355.54



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ


<http://www.ksp.tul.cz>

Příloha 5: Inspekční certifikát pro vzorek tloušťky $t = 5 \text{ mm}$

A02 **INSPEKČNÍ CERTIFIKÁT "3.1"**
EN 10204:2004

ArcelorMittal

A04
A03 číslo dokumentu: 16601/2011

A08	Číslo zakázky výrobce: 1451/1785001	A10	Číslo dodacího návěští: 110528											
A09	Číslo objednávky dodavatele:													
A07	Číslo objednávky odběratele / číslo položky: 354100086/301 1100242217 000002	A06	Odběratel / příjemce:											
B13 B12	Skutečná hmotnost: 4858 kg Teoretická hmotnost:													
B01 B02 B03 B04 B05 B09	Výrobek, rozměr, druh oceli, stav, dodací podmínky: Tyč ocelová plochá válcovaná za tepla P20X5 Délka : 06100 EN 10025-2:2004 S235JR EN 10058:2003 ČSN EN 10025-2:2005													
C71	Tavební chemická analýza (%)										B08			
B07	Číslo tavby:	C70	C	Mn	Si	P	S	N2	Cu	Ni	Cr	Mo	kusy	svazky
	28851Y	0	0.14	0.62	0.190	0.012	0.008	0.009	0.04	0.02	0.02	0.004	989	2
<input checked="" type="checkbox"/> 1. Pokračování v příloze														
5	Výsledky zkoušek:		2. Zkouška tahem						4. Zkouška rázem v ohybu		Kontrakce	Poměr Re/Rm		
	C00 Č. zkoušky:	C02	C11 Mez kluzu	C12 Pevnost v tahu	C13 Tažnost	C03 Zkušební teplota (°C)	C40	C41	C50	C51				
	C04 Předpis:		MPa	MPa	% A5		CD4 min: J							
B07	Číslo tavby:		275	410 510	min. 26.0		CD43	C42						
	28851Y	000123	0	330	481	34.2								
<input type="checkbox"/> 1. Pokračování v příloze														
C52	Zkouška lámavosti () vyhověla <input type="checkbox"/>													
B06 Z04	Značení výrobku dle kontraktu													
<div style="text-align: center;">  <p>1028 1028 - CPD - 07902582</p> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 10px auto;"> <p>Určeno k užití: ve stavebnictví a strojírenství Svařitelnost: zaručena srovnatelným ekvivalentem (Cev)</p> </div>														
C93	Hodnota hmotnostní aktivity ionizujícího záření v tavební analýze nepřesahuje 100 Bq/kg													
D01	Kontrola a zkoušky byly provedeny na dodávaném výrobku nebo výrobní zkušební jednotce.													
Z01	Výrobce potvrzuje, že tento výrobek je v souladu s požadavkem objednávky, kupní smlouvy a byl zkoušen, kontrolován v souladu s technickými požadavky objednávky.													

Z02 Datum / vystavil: 01.12.2011/ DRNO

Z03

A05

A01 ArcelorMittal Ostrava a.s. TEL: ++420-595682303
Vratimovská 689 FAX: ++420-595682114
707 02 Ostrava-Kunčice
Česká republika

ArcelorMittal Ostrava a.s.
Vratimovská 689, 707 02 Ostrava-Kunčice
IČ: 48193258 017


Odborný znalec
Identifikační č. 3
p. Radomír Poledník
Tel: ++420 595682721

nahrazuje razítko a podpis
odborného znalce


N14021

Příloha 6: Inspekční certifikát pro vzorek tloušťky t = 10 mm

A02 **INSPECTION CERTIFICATE "3.1"**
EN 10204:2004


ArcelorMittal


A03 Document No: 16638/2011

A08	Manufacturer's works order number: 1451/1784901		A10	Delivery Advice No.: 110528										
A09	Supplier Reference No.:													
A07	Purchase Order No.: 354100086/301 1100242217 000001		A06	Customer/consignee:										
B13 B12	Real weight: 2485 kg													
	Theoretical weight:													
B01 B02 B03 B04 B05 B09	Product, Dimensions, Steel designation, Condition, - Terms of Delivery, Any supplementary requirements : FLAT BARS P20X10 LENGTH: 06100 Hromada SJV S235JR EN 10058:2003 ČSN EN 10025-2:2005													
C71	Chemical Analysis of Liquid Alloy %											B08		
B07	Heat No.:	C70	C	Mn	Si	P	S	N2	Cu	Ni	Cr	Mo	Quantity	Bunches
	29566Y	0	0.10	0.70	0.203	0.009	0.011	0.007	0.06	0.03	0.05	0.007	262	1
	<input checked="" type="checkbox"/> 1. Continuation see Attachment													
5	Test results:		2. Tensile test					4. Impact Bending test			Contraction	Ratio Re/Rm		
	Test results		C02	C11 Yield Point	C12 Tensile Strength		C13 Elongation	C03 Test tem- perature (°C)	C40 C04min:	C41 J	C42	C50	C51	
B07	Heat No.:	C00 Test No.: C04 Regulation:		MPa	MPa		% A5 min.26.0		ØC43					
	29566Y	000361	0	283	419		38.2							
	<input type="checkbox"/> 1. Continuation see Attachment													
C52	Bend Test () conforming <input type="checkbox"/>													
B06 Z04	Marking of the product according to the contract													
	 <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;"> Designed for the following applications: civil and machine engineering Weldability: guaranteed through carbon equivalent (Ceq) </div>													
C93	The mass activity of ionizing radiation value in liquid alloy analysis does not exceed 100 Bq/kg.													
Z01	The producer confirms that this produkt conforms to the requirement of the order of the purchase agreement and that it was tested, inspected according to the technical requirements of the order.													
D01	The inspection and the test were carried out on the delivered produkt or on a produkt test unit.													

Z02 Date / Issued by: 01.12.2011/ DRNO

Z03
A05

A01 ArcelorMittal Ostrava a.s. TEL.: ++420-595682303
Vratimovská 689 FAX: ++420-595682114
707 02 Ostrava-Kunčice
Czech Republic


ArcelorMittal Ostrava a.s.
Vratimovská 689, 707 02 Ostrava-Kunčice
IČ: 48193258

017

WORKS INSPECTOR
IDENTIFICATION No. 3
p. Radomír Poledník
PHONE: ++420 595682721

replaces seal and signature

N14023

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských prav užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnou-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL, v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum: 6. 1. 2012

Podpis:

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll.applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact, in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date: 6. 1. 2012

Signature: